



TECHNISCHE UNIVERSITÄT CHEMNITZ

**Zur kosteneffizienten Herstellung
von gewickelten Faserverbundwalzen unter
Berücksichtigung der Methode der Lean Production**

Von der Fakultät für Maschinenbau der
Technischen Universität Chemnitz

genehmigte Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

vorgelegt

von Dipl.-Ing. Thomas Maurer
geboren am 9. Oktober 1962 in Birkenau im Odenwald

eingereicht am 28. März 2013

1. Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. habil. Lothar Kroll
2. Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl
Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Lampke

Chemnitz, 6. November 2013

Bibliografische Beschreibung

Maurer, Thomas

Zur kosteneffizienten Herstellung von gewickelten Faserverbundwalzen unter Berücksichtigung der Methode der Lean Production

Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Chemnitz, Institut für Strukturleichtbau, Chemnitz, 2013

145 Seiten

27 Tabellen

113 Abbildungen

139 Literaturstellen

Referat

In den letzten 20 Jahren näherte sich der einst nur für die Luft- und Raumfahrt entwickelte kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff (CFK) mehr und mehr der industriellen Umsetzung in anderen Bereichen an. Die CFK-Halbzeuge und -Bauteile sind nun auch preislich in der Lage, unter Anwendung angepasster Fertigungsverfahren breiter eingesetzt zu werden. Der Fokus dieser Arbeit richtet sich exemplarisch auf die kosten- und energieeffiziente Herstellung von schnell laufenden CFK-Verbundwalzen und soll aufzeigen, dass Kostenersparnisse über Leane Fertigungsmethoden auch in der FKV-Industrie von großem Vorteil sind. Somit liefert diese Dissertationsschrift einen beispielgebenden Beitrag für den Durchbruch von Faserverbundwerkstoffen im industriellen Bereich. Darüber hinaus werden durch Prozessoptimierung Alternativen aufgezeigt, qualitativ hochwertigere und gleichsam kosteneffiziente Bauteile herzustellen.

Schlagworte

Anisotropie, Automatisierung, Faser-Kunststoff-Verbund, Filament-Winding, Fügetechnik, hygromische Eigenspannungen, Klebstoff, Kohlenstofffaser, Kostenreduktion, Krafteinleitung, Leane Fertigung, Leichtbaukonstruktion, Mischbauweise, Prozessoptimierung, Taktzeiterhöhung, Regenerative Energien, Taylor, Womack

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Industrietätigkeit bei der Firma Voith Paper Rolls GmbH & Co KG in Wimpassing im Schwarzatal (Österreich).

Mein besonderer Dank gebührt Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Lothar Kroll, Leiter der Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung, Direktor des Institut für Strukturleichtbau der Technischen Universität Chemnitz und Direktor des An-Institutes für Textil- und Verarbeitungsmaschinen gGmbH, CETEX, für die Betreuung der Arbeit, der Übernahme des Referates sowie für das entgegengebrachte Vertrauen. Seine stets wohlwollende Unterstützung und die fachlichen Diskussionen, verbunden mit den wertvollen Hinweisen, vor allem zum Themengebiet der Berechnung anisotroper Verbundstrukturen, haben entscheidend zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl vom Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF) der Universität Stuttgart und des Fraunhofer-Instituts für Produktionstechnik und Automatisierung IPA in Stuttgart danke ich für die Übernahme des Koreferates und für die konstruktiven Diskussionen während der Erstellung der Dissertationsschrift.

Ferner gilt mein Dank allen Mitarbeitern der Professur SLK, insbesondere Herrn Dr.-Ing. Holger Seidlitz sowie Herrn Dipl.-Ing. Mario Naumann für ihre entgegenkommende Unterstützung und die hilfreichen Fachgespräche. Weiterhin danke ich Herrn Uwe Wehnhardt für die Erlaubnis und Unterstützung der Erstellung dieser berufsbegleitenden Arbeit sowie Herrn Martin Bassmann für die kritischen wie inspirierenden Fachdiskussionen, die einen nicht geringen Beitrag zu dieser Arbeit geleistet haben. Für die gute Zusammenarbeit bedanke ich mich auch bei der Firma FILL GESELLSCHAFT M.B.H in Gurten (Österreich), insbesondere bei den Herrn Ingenieuren Robert Reitinger und Wilhelm Rupertsberger.

Ein außerordentlicher Dank gilt meiner Frau Ute, meinem Sohn Kimon, meiner Tochter Aiyana, sowohl für die ständige Unterstützung als auch für die Akzeptanz an mangelnder gemeinsamer Zeit während der Erstellung der vorliegenden Dissertationsschrift.

Gewidmet ist diese Arbeit meinem Vater Ing. (grad.) Richard Maurer

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Motivation und Zielsetzung	2
3	Entwicklung der Rohstoffkosten.....	7
3.1	Abhängigkeit vom Rohöl	8
3.2	Preisentwicklung von Stahl.....	8
3.3	Preisentwicklung von Kohlenstofffaser im Vergleich zu Stahl	9
3.4	Automatisierung	10
4	Selektion des Untersuchungsgegenstandes.....	12
4.1	Typenauswahl für die Untersuchung	12
4.2	Belastung und Geometrie	14
4.3	Verwendete Rohstoffe.....	17
4.3.1	Fasern	17
4.3.2	Matrix-System	19
4.4	Hygrothermische Eigenspannungen.....	24
4.5	Berechnung der Laminatstruktur.....	27
4.6	Wettbewerbsvorteil und Routine.....	29
4.7	Das schlanke Produktionskonzept „Lean“	32
5	Allgemeine Anforderungen an den Prozess	35
5.1	Kernkompetenz und Fertigungstiefe	35
5.2	Prozessbeschreibung	35
5.2.1	Sektionen	36
5.2.2	Auswuchten	69
5.3	Qualität	70
5.3.1	Total Quality Management.....	70
5.3.2	Prozessintegrierte Qualitätssicherungsverfahren.....	73

5.4	Der konventionelle Prozess	75
5.4.1	Untersuchte Fertigungsart	75
5.4.2	Materialfluss	76
5.5	Analyse des konventionellen Prozesses	77
5.5.1	Herstellkosten	77
5.5.2	Lernkurve.....	81
6	Der Leane Ansatz in der Composite-Fertigung	83
6.1	Zielstellung	83
6.2	Lean Prozess in der Umsetzung der Sektionen	83
6.2.1	Störfunktion „Doppelwickeln“	84
6.2.2	Sektionen	86
6.3	Kostenanalyse.....	96
7	Zusammenfassung und Ausblick	97
8	Verzeichnisse	99
8.1	Literatur- und Quellenverzeichnis.....	99
8.2	Abbildungsverzeichnis	108
8.3	Tabellenverzeichnis.....	111
8.4	Zitierte Patente	111
9	Anhang.....	112

Kurzzeichenverzeichnis

Lateinische Buchstaben

Kurzzeichen	Einheit	Bezeichnung
D_a	mm	Außendurchmesser
d	mm	Durchmesser
E	MPa	Elastizitätsmodul
e	g·mm/kg	Exzentrizität
F	N	Kraft
F_1, F_2	N	Fadenspannkraft (Seilzug/Seilkraft)
F_E	kN	Einpresskraft
G	MPa	Schubmodul
HK	€	Herstellkosten
HR	%	Relative Kosten
k	-	Faktor 1000
K_c	-	Konstante der Verschiebungs-Dehnungs-Beziehung
K_d	mm ⁻¹	Konstante der Verschiebungs-Dehnungs-Beziehung
m	kg	Masse
M_Δ	kg	Rel. Massenveränderung; Rel. Flüssigkeitsaufnahme
n	-	Stück
p	10 ⁵ N/m ²	Druck
Q	mm/s	Qualitätsstufe
R	g	Restunwucht
r, r_o	mm	Radius
rpt	min ⁻¹	Umdrehung (repeat)
Rz	µm	Oberflächenrauigkeit
Shore A	SHA	Oberflächenhärte nach Shore
T	°C	Temperatur
T_Δ	°C	Temperaturdifferenz
t	min	Zeit
tex	g/(1000m)	Garnfeinheit (Tex)
T_G	°C	Glasübergangstemperatur
t_L	min	Lagerzeit
U	g·mm	Unwucht
\ddot{U}	mm	Übermaß
u, v, w	mm	Verschiebung im zyl. Koordinatensystem
v_{Tape}	m/min	Tapegeschwindigkeit
y	mm	Biegung

Griechische Buchstaben

Kurzzeichen	Einheit	Bezeichnung
f	Stück	Fehler
α	K^{-1}	Wärmeausdehnungskoeffizient
β	10 ⁻³ /°M	Quellkoeffizient
$\gamma, \varsigma, \chi, \delta$	°	Winkel
ε	-	Dehnung
η	mPas	Viskosität
κ	-	Scherung
μ_H	-	Haftreibungskoeffizient
ν	-	Querkontraktionszahl
ρ	g/cm ³	Dichte
σ	N/mm ²	Spannung
τ	N/mm ²	Schubspannung; Schubfestigkeit
φ	%	Faservolumengehalt
φ_g	%	Fasergewichtsanteil

Indices und Koordinatensysteme

Index	Bezeichnung
1, 2, 3	Richtung; kartesische Koordinaten der Einzelschicht
a	Axialkraft
G	Glasübergang
g	Gewichtsanteil
N	Normalkraft
R	Reibungskraft
r, φ , z	Zylinderkoordinaten
RL	Radius
Ro	Roving
UL	Umfang
x, y, z	Kartetische Koordinaten
Z	Zug
zul	Zulässig
Δ	Unterschied, Differenz

Abkürzungen

Zeichen	Bezeichnung
APP	Asia Pulp & Paper
AST	Advanced Surface Technology
BIAX	B iaxial (Verstreckung)
C-Faser	Kohlenstofffaser (C arbon- F aser)
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter K unststoff
CIP	C ontinuous I mprovement P rocess
CLT	Klassische-Laminattheorie

CNG	C ompressed N atural G as
DDK	D ynamische D ifferenz K alorimetrie
DETDA	D iethyltoluoldiamin
DMS	D ehnungsmessstreifen
DSC	D ifferential- S canning- C alorimetry
DTS	D rahtträgersystem
EP	E poxyd H arz
ERP	E nterprise- R esource- P lanning
FK	F aser- K unststoff
FKV	F aser- K unststoff- V erbund
FW	F ilament- W inding
GFK	G lasfaserverstärkter K unststoff
GTS	G las T ape S chicht
HT-Fasern	H igh T ensity-Fasern
ID	I dentifikationsnummer
IMVP	I nternational M otor V ehicle P rogram
IR	I nfrarot
k.A.	K eine A ngaben
Keel	K rafteinleitungselement
lfm	l aufender M eter
LP	L ean P roduction
LPG	L iquefied P etroleum G as
MD	M isch- und D osieranlage
MEK	M ethyl E thyl K eton
MIT	M assachusetts I nstitute of T echnology
MMbopd	1 M illion B arrel Ö l pro T ag
MSV	M ehr- S chicht- V erbund
MWp	M ega W att p eak
NGV	N atural G as P owered V ehicles
OEM	O riginal E quipment M anufacturer
OPEC	O rganization of P etroleum E xporting C ountries
PAN	P oly A cryl N itril
PCTA	P lanen, T un, C hecken, A gieren
PEG	P olyethylenglykol
PFK-Maschinen	P apier-, F olie- und K rempelmaschinen
PKD	p olykristalliner D iamant
PM	P apermachine
PV	P hotovoltaik
QAB	Q ualitätsabweichungsbericht
RE	R egenerative E nergien
RS	R ovingseperator
RT	R aumtemperatur
SIC	S iliziumcarbid
TCO	T otal C ost of O wnership
TPS	T oyota P roduktionssystem
u.a.	u nter a nderem
UD	U ni D irectional
UHM	U ltra H igh M odulus
vgl.	v ergleiche
VK	V erkaufspreis
WOB	W alzenoberflächenbreite

1 Einleitung

In den letzten 20 Jahren näherte sich der einst nur für die Luft- und Raumfahrt entwickelte kohlenstofffaserverstärkte Kunststoff (CFK) mehr und mehr der industriellen Umsetzung in anderen Bereichen an. Die CFK-Halbzeuge und Bauteile sind nun auch preislich in der Lage, unter Anwendung angepasster Fertigungsverfahren breiter eingesetzt zu werden. Der Fokus dieser Arbeit richtet sich exemplarisch auf die kosten- und energieeffiziente Herstellung von schnell laufenden CFK-Verbundwalzen und soll aufzeigen, dass Kostenersparnisse über die Methode der Lean Production auch in der Faserkunststoffverbund-Industrie (FKV-Industrie) von großem Vorteil sind. Somit liefert diese Dissertationsschrift einen beispielgebenden Beitrag für den Durchbruch von Faserverbundwerkstoffen im industriellen Bereich. Darüber hinaus werden durch Prozessoptimierung Alternativen aufgezeigt, qualitativ hochwertigere und gleichsam kosten-effiziente Bauteile herzustellen.

Faserverbundwalzen finden hauptsächlich Anwendung in den Bereichen Papier-, Folie- und Vliesherstellung (Nonwoven). Die Einführung dieser Maschinenbauteile erlaubte den Herstellern und Betreibern von Produktionsanlagen anspruchsvolle Betriebspunkte zu wählen, die einen positiven Einfluss auf die Effektivität der Maschinen erzielen. FKV-Walzen, vorzugsweise hergestellt mit Kohlenstofffasern, werden industriell seit Beginn der 1990er Jahre produziert. Die Grundsteine dieser Entwicklung haben die Firmen SGL AG sowie Freudenberg & Co. KG gelegt. Zudem haben beide Unternehmen auch mit der Vermarktung dieses Produktes begonnen. Mittlerweile haben die „Player“ gewechselt, der Markt hat sich ferner deutlich vergrößert. Die Herstellungstechnologie ist jedoch nach wie vor unverändert. Die technologische Hürde ist stetig gesunken, das Produkt gilt breit als beherrschbar.

Die Eignerfirmen des Produktes Compositewalzen sind meist mittelständisch geprägt, haben in der Regel um die 35 Mitarbeiter pro Standort und unternehmerisches Handeln steht im Vordergrund. Budgets für Entwicklungen sind eher rar, wenn doch vorhanden, werden diese meist nur auf direkten Kundenwunsch betrieben. Präventive Entwicklung, insbesondere in der Produktion, ist aus wirtschaftlicher Sicht schwer möglich. Der Prozess ist sequenziell und meist isoliert aufgebaut. Der Kunststoffbereich, somit die eigentliche Compositefertigung als solche, ist getrennt von der spanenden Bearbeitung. Die Qualitätssicherung ist meist noch passiv begleitend, aber kein integrativer Bestandteil der Produktion. Die Beschichtungen dieser Walzen werden in der Regel extern zugekauft, mit zum Teil erheblichem logistischem Aufwand. Die Losgrößen von gleichartigen Walzensystemen, welche zeitgleich hergestellt werden, liegen meist unter zehn Stück, nur in ganz seltenen Fällen werden übereinstimmende Bestellungen bis zu 30 Stück in einem Auftrag platziert, wobei diese Aussage für FK-Walzen mit einer Länge größer sechs Metern zutrifft. Die zunehmende Industrialisierung dieses Werkstoffes, somit auch der herrschende Preisdruck, macht es notwendig, über erweiterte Herstellungsverfahren nachzudenken. Es besteht immer mehr Bedarf an Produkte bei denen Stückzahlen bis zu 100 pro Woche und teilweise mehr gefordert werden. Ein Beispiel, wie wenig zurzeit dieser Werkstoff, nicht zuletzt wegen der geringen Industrialisierung, in Marktsegmenten bekannt ist, zeigt das Buch von SIMON „Hidden Champions des 21. Jahrhunderts“ [Sih 07]. Firmen, wie Voith AG, Trumpf Werkzeugmaschinen oder SAP AG sind dort breit zitiert, der Begriff Composite kommt nicht vor, allenfalls der Firma SGL CARBON sind einige wenige Zeilen gewidmet. Die Methode der Schlanken Produktion (Lean Production), wie in den 1980er Jahren von James P. Womack in der MIT-Studie erarbeitet, wird in dieser Arbeit herangezogen und für die Fertigung von Faserverbundwalzen modifiziert. Aufgrund der Komplexität der CFK-Walzenfertigung können die erarbeiteten Verfahren selbstverständlich auch für andere Produkte, wie FKV-Antriebswellen, verwendet werden.

2 Motivation und Zielsetzung

FKV-Walzen sind seit Ende der 1990er Jahre Standard in Papier-, Folie- und Krempelmaschinen. Eine Kohlenstofffaserwalze, je nach Ausführungsform, kann bis zum Mehrfachen einer baugleichen Stahl- oder Aluminiumwalze in der Anschaffung kosten. Die anwendungsbedingten Vorteile sind jedoch erheblich. Aufgrund der anisotropen Eigenschaften des Werkstoffes können viele spezielle Anforderungen zielgerichtet realisiert werden. Obwohl die Längssteifigkeit der FKV-Walze in der Regel, bei reiner Verwendung von HT-Fasern, nur bei circa 40 % der vergleichbaren Stahlwalze liegt, ist die Masse markant geringer, die Eigenfrequenz aber deutlich höher. Alleine diese Merkmale – ohne den Temperatúrausdehnungskoeffizienten, der kaum merklich über null liegt, sowie das einzigartige Dämpfungsverhalten näher zu betrachten – liefern dem System Faserverbundwalze für die schnell laufende Bahnwarenverarbeitung monetäre Vorteile für den Betreiber. Der Punkt, ab welcher Geometrie FK-Walzen technisch und wirtschaftlich sinnvoll sind, hängt von einigen Parametern ab, die aber nicht Gegenstand der Arbeit sind.

„Weit ist der Weg von der Kleinserien- zur Großserienfertigung und steinig.“ Zu diesem Fazit kommt die aktuelle Studie „Serienproduktion von hochfesten Faserverbundbauteilen“. Die Unternehmensberatung Roland Berger und der VDMA ergründen darin anhand von Experteninterviews, was die deutschen Maschinen- und Anlagenbauer tun können, um die – heute meist händischen – Prozesse Schritt für Schritt zu industrialisieren. Hohe Stückzahlen bei den glasfaser- und kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffbauteilen, so der Kern der Studie, erfordern zuerst leistungsfähige Automatisierungslösungen [RBe 12].

Voith Paper GmbH lieferte auf der Insel Hainan, der südlichsten Provinz Chinas, eine der produktivsten Feinpapiermaschinen der Welt. Diese Maschine, genannt „Hainan PM2“, produziert hochwertiges mehrfach gestrichenes Feinpapier. Die Arbeitsbreite liegt bei über zehn Metern. Die PM2 ist circa 670 Meter lang und auf eine Konstruktionsgeschwindigkeit von 2.000 m/min ausgelegt. Betreiber für die PM2 auf Hainan ist Asia Pulp & Paper (APP), einer der weltweiten Top 10-Papierhersteller. Die PM2 von Hainan orientiert sich im Maschinenkonzept an der PM3 in Dagang (China), die 2010 die schnellste Feinpapiermaschine der Welt war. Durch ständige Innovationen optimiert Voith Paper den Papierherstellungsprozess kontinuierlich [GRT 07]. Auf dieser Papiermaschine werden jährlich bis zu rund einer Million Tonnen grafische Papiere produziert. Für die Papiermaschine PM2 lieferte zum Beispiel Siemens 185 Antriebssysteme mit einer Gesamtanschlussleistung von mehr als 40 Megawatt sowie die Antriebe für Rollenschneider, Umroller und Off-Line-Kalander. Über 100 Kohlenstofffaserwalzen sind in der Maschine verbaut.

Die Abbildung 1 zeigt schematisch den multimateriellen Aufbau einer Hochleistungs-FKV-Walze für die Papierherstellung. Der Zapfen (1), wie auch der Boden (2) sind aus Metall, meist aus Stahl, nicht jedoch zwingend in identischer Legierung. Der FKV-Körper (3), in der Regel hergestellt aus gleichen oder gemischt steifen Kohlenstofffasern, sorgt für die mechanischen Grundeigenschaften der FKV-Walze. Die Decklagen hingegen werden oft mit einer Mischung aus Glas- und Kohlenstofffasern hergestellt. Es folgt die Base-Layer-Schicht (4) für die Vorbereitung zur finalen Beschichtung, der nicht von jedem Hersteller verwendet wird, technisch jedoch sehr sinnvoll ist. Final wird die Beschichtung (5) aufgebracht. Hier kommen verschiedenste Werkstoffe zum Einsatz, von Elastomeren- bis Compositebeschichtungen. Das bedeutet, dass eine FKV-Walze aus bis zu fünf verschiedenen Materialien bestehen kann.

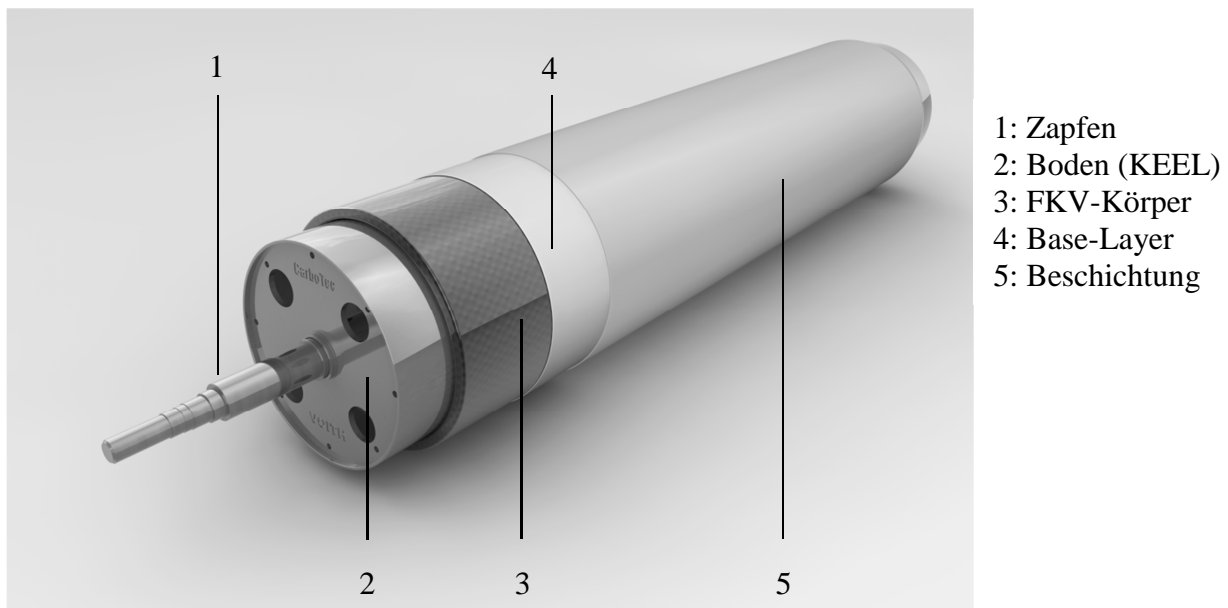


Abbildung 1: Typischer Aufbau einer Kohlenstofffaserwalze [Biz 12]

Bis 2006 waren FKV-Walzen im Bereich der Papierfabrikation auf Bahnführungssysteme sowie in sehr geringen Stückzahlen auf die Schüttelung, vgl. Erklärung Anhang Kapitel 9, beschränkt. Hier gab es gerade drei Produzenten, die als nicht Papiermaschinen-OEM in dieses Segment zulieferten. Im Jahr 2008 verkaufte Metso Paper seinen Produktionsstandort für Faserverbundwalzen und sourcte diese Maschinenelemente von externen Lieferanten zu. Als Pionier für den breiten Einsatz von Kohlenstofffaserwalzen gelang es der Firma Voith Paper vom Stoffauflauf bis zur Aufrollung weitere Einsatzpotenziale zu erschließen. Während diese Arbeit geschrieben wurde, liefen zudem Untersuchungen, auch die höchst belasteten Tamboure aus Faserkunststoffverbund herzustellen. Es wurden in jüngerer Vergangenheit verschiedene Typen, bei Voith Paper als „CarboTec-Typen“ bezeichnet [biz 12], generiert. Die Funktionen und somit Belastungen unterschieden sich drastisch. Von der einfachen Papierleitwalze bis hin zur hoch belasteten Siebantriebswalze, die speziell für heiße und feuchte Umgebung entwickelt wurde, reicht die Palette. Voith Paper erkannte früh die Notwendigkeit der Beherrschung dieser Herstellungstechnologie als essenziell wichtig für den Bau von schnellst laufenden Papiermaschinen.

Seit der industriellen Revolution im 18. und 19. Jahrhundert und dem Aufkommen von kraftbetriebenen Maschinen sowie den kontinuierlichen Abläufen von Produktionsprozessen, das heißt beim Übergang von handwerklicher auf maschinelle Fertigung, ist die metallische Walze ein verfahrensbestimmendes Element [Zef 91]. Der konventionelle Herstellungsprozess wird oft nur mit einer Werkstoffart durchgeführt, was Kenntnisse in Material und Prozess erheblich vereinfacht. Eine nicht zählbare Summe von Firmen hat sich auf die kostengünstige und hochqualitative Herstellung solcher unimateriellen Systeme (Stahl- oder Aluminiumwalze) spezialisiert. Nicht so im Bereich der FKV-Walzen. Hier findet in den Produktionsstätten kein linear verketteter Fertigungsfluss statt, Composite- und metallische Bearbeitung sind in der Regel meist fachlich und örtlich voneinander getrennt. Die Kompensation dieses Sachverhaltes bietet für den Wirtschaftsstandort Deutschland Chancen, einerseits die zielgerichtete Entwicklung innovativer wettbewerbsdominanter Produkte voranzutreiben, andererseits die Gestaltung durchgängige und effiziente Prozessketten mit hoher Wertschöpfung zu etablieren und davon zu profitieren. Allgemein zeigte eine Analyse [BHS 08] gegenwärtiger Serienprozesse im Bereich der FKV, dass die Automatisierungstiefe bei mechanisch gering belasteten langfaserigen Bauteilen schon heute zahlreiche voll automatisierte Fertigungsprozesse aufweist. Dem gegenüber stehen bei

FKV-Bauteilen mit hoher Fertigungsausbeute, was zwangsläufig eine gezielt ausgerichtete Faserarchitektur erfordert, keine geschlossenen Produktionsprozesse aus Sicht der Automatisierungstechnik zur Verfügung. Die Herstellung solcher Produkte bedarf oftmals manueller Eingriffe, insbesondere in den qualitätssensiblen Prozessschritten oder dem Halbzeugtransport. Für eine breite Markteinführung, besonders von Faserverbundprodukten, kommt es daher auch auf eine Bereitstellung serientauglicher, robuster und effizienter Fertigungstechnologien an, wie sie etwa beim Spritzgießen bereits erfolgreich eingesetzt werden [BHS 08]. Um das Produkt FKV-Walze stärker zu vermarkten, müssen somit die Herstellkosten drastisch reduziert werden. Das Ziel der Untersuchung ist es, zu ermitteln, inwieweit das Produkt „FKV-Walze“ zu einem definierten Zeitpunkt unter geringstem Kosten- und Kapitalaufwand hergestellt werden kann. Im Weiteren wird die Produktion als betriebliche Leistungserstellung definiert [GKA 07]. Es ist für das herzustellende Produkt „FKV-Walze“ notwendig, das strategische Produktionsziel festzulegen.

Tabelle 1: Strategisches Produktionsziel [GKA 07]

Strategische Produktionsziele			
Mengenoptimierte Produktion	Wirtschaftliche Produktion	Humane Produktion	Ökologische Produktion
Hohe Produktivität Große Stückzahlen Geringer Materialverbrauch Geringe Ausschussmengen I	Hohe Wirtschaftlichkeit Geringe Herstellkosten Maximale Auslastung Geringe Kapitalbindung Hohe Rentabilität	Hohe Sicherheitsstandards Anspruchsvolle Inhalte Ergonomische Arbeitsplätze Hoher Qualifikationsgrad III	Geringer Ressourceneinsatz Geringer Schadstoffausstoß Minimale Abfallmengen Hohe Recyclingquoten
Operative Produktionsziele			
Wenig Nachbesserungen Geringe Ausfallraten Niedrige Fehlerquote Hohe Produktqualität a	Schnelle Lieferzeit Minimale Rüstzeit Minimale Durchlaufzeit Schnelle Produktentwicklung	Große Erweiterungsfähigkeit Schnelle Umrüstbarkeit Optimale Betriebsmittelredundanz Schnellere Anpassungsfähigkeit b	
Qualität	Zeit	Flexibilität	
Strategische Produktionsziele			

Der aktuelle Stand der Herstellungstechnik entspricht der Matrixroute **IIIa**. Diese Produktionsart entstand aus der Erweiterung der konventionellen Herstellung von Stahlwalzen, in der die Composite-Fertigung als eigenständiger Prozess vorgeschaltet wird. Der Grund, dass diese Prozesse oft unabhängig voneinander in Serie geschaltet werden, hat verschiedene Ursachen. Die Hauptursache ist jedoch die stark unterschiedliche Herstellungsmethode der Grundwerkstoffe, in

diesem Fall das „Walzenrohr“ selbst. Untersucht werden soll nun die Möglichkeit der Matrixroute **Ib**. In dieser Kombination soll eine Prozesskette entwickelt werden, die im Fluss hürdenfrei und effizient produziert. Die Werkstoffe Stahl und FKV sind als konkurrenzfreie Rohstoffe im Herstellungsweg zum Endprodukt zu sehen. In den Jahren 1856 bis 1915 fokussierte FREDERICK WINSLOW TAYLOR stringent den Grundsatz, die Anwendung der menschlichen Arbeitskraft zum Gegenstand wissenschaftlicher Beobachtungen und Analysen zu machen und die daraus gewonnenen Erkenntnisse zum Nutzen aller zu verwenden [Hew 99]. Taylor wollte eine Brücke über die Kluft zwischen Arbeiter und Unternehmer spannen. Er verfolgte durch seine Untersuchungen das Ziel, die Produktivität zu erhöhen und somit die Gewinne als auch die Anerkennung den Arbeitern gegenüber zu steigern. Die Arbeitsmethoden des so benannten Taylorismus entwickelte HENRY FORD dahin gehend weiter, dass FORD zur absolut wiederholbaren Detaillierung der Arbeitsmethode noch einen Materialfluss überlagerte. Er erkannte schnell das Potenzial von fließenden Abläufen [WJo 04]. Seine Konzentration lag somit auf dem kontinuierlichen Ablauf der Prozesskette. Benötigte FORD zu Beginn seiner Tätigkeit noch 12,5 Stunden für eine Einheit, so optimierte er den Zustand auf einen Takt von 30 Sekunden. Weiterhin war er dadurch in der Lage, die Herstellkosten um über 50 % zu senken.

Durch das Erzeugen von Sachzwängen erfolgt eine Verzahnung der einzelnen Komponenten untereinander. Weiterhin ist die Kooperation mehrerer Instanzen (Bereiche) ein wesentliches Element. Der signifikante Unterschied von OHNOs Philosophie [Oht 93] gegenüber dem Taylorismus ist nicht die Output-Optimierung (Schubprinzip), sondern die exakte Bedienung der Abnehmerwünsche (Zugprinzip). Grundlage hierfür ist die Erkenntnis, dass nicht durch Arbeit Werte geschaffen werden, sondern durch Bedarfsdeckung [GKA 07]. In der Leanen Produktion werden Fehler in der laufenden Produktion beseitigt, auch unter Akzeptanz, dass die Produktion gestoppt wird. Es unterscheiden sich u.a. hier die Philosophien von TAYLOR und OHNO. TAYLOR fokussiert die Bewegung und somit den Output, OHNO hingegen legt den Schwerpunkt auf die Herstellung von fehlerfreien Teilen, also auf die Vermeidung von Verschwendung. Ein weiterer Faktor in der Betrachtung ist die Mentalität der Japaner selbst. Geistige Werte, wie Harmonie, Konformität, Bescheidenheit, Fleiß, sowie ein permanentes Streben nach Verbesserung zeichnen die Menschen aus [Oht 93]. Das Unternehmen ist ein Teil der Familie, Arbeit steht im Lebensfokus. Krankheit wird als Schwäche gedeutet. Mit 17 Tagen Urlaub im Jahr stehen Japaner weit hinter dem europäischen Standard zurück. Meist wird der Urlaubsanspruch nicht einmal gänzlich verwertet [Kut 10].

HERBECK [Hel 08] zeigte in seiner Untersuchung, siehe Abbildung 2, das Potenzial zur Automatisierung auf. Unter den Fertigungstechnologien, insbesondere für endlosfaserverstärkte Bauteile, die ein hohes Automatisierungspotenzial aufweisen, ist das Filament-Winding (FW) neben der Pultrusion mit an der Spitze zu sehen. Der Automatisierungsgrad beschränkt sich aber nur auf den reinen Produktionsprozess des Halbzeuges. Die FW-Fertigungstechnologie eignet sich sehr gut für eine Gesamtautomatisierung. Aktuelle Anlagen produzieren zurzeit bereits bis zu 100.000 FKV-Druckbehälter pro Jahr [JEC 07]. Abbildung 3 zeigt die prozentuale Verteilung der verschiedenen Herstellungsverfahren für glasfaserverstärkte Kunststoffe in Europa 2006 [AVK 07]. Ungefähr 12 % des europäischen Produktionsvolumens werden mit dieser Technologie abgebildet [Rem 08]. Vergleiche hierzu die Übersicht der im europäischen Markt aktiven Produzenten von FKV-Walzen zu Untersuchungsbeginn, Tabelle 18, Kapitel 9 im Anhang.

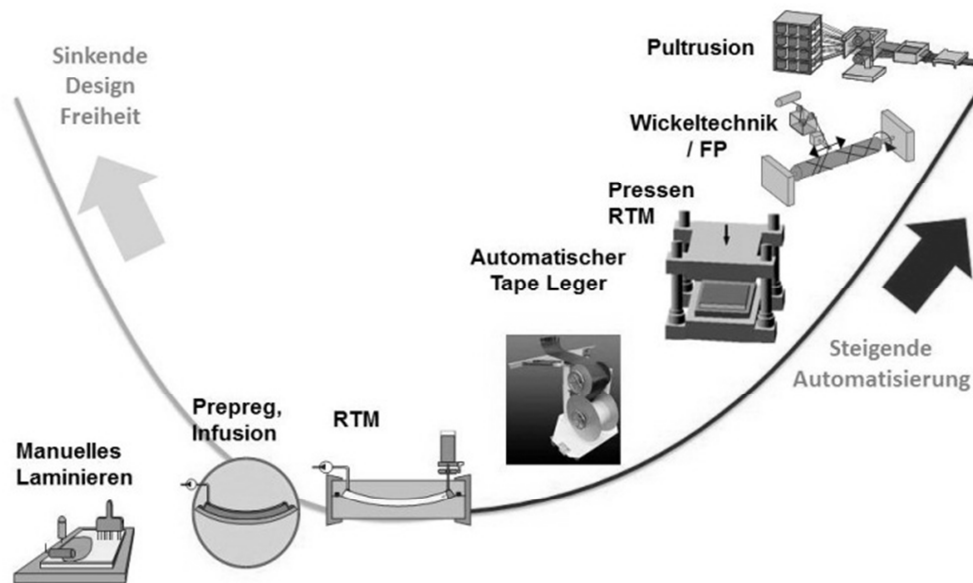


Abbildung 2: Faserverbund-Fertigungsverfahren [Hel 08], (Originalbild)

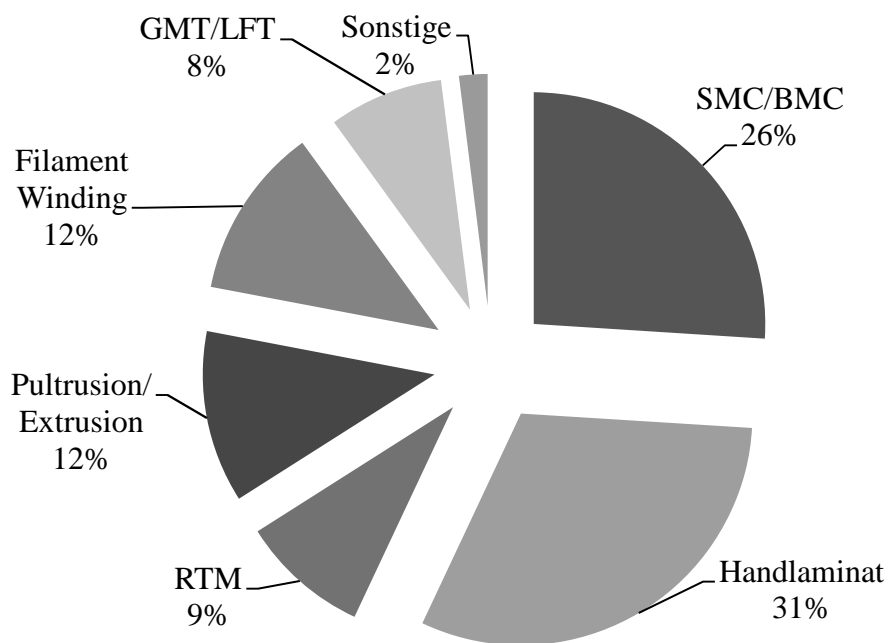


Abbildung 3: Verteilung nach AVK [AVK 07]

3 Entwicklung der Rohstoffkosten

Im Jahr 1998 prognostizierte BURG [Bup 98] die Preisentwicklung der HT-Kohlenstofffaser entsprechend der in Abbildung 78a, vgl. Anhang Kapitel 9, dargestellten Funktion. In seinen Prognosen zeigte Burg bis zum Jahr 2000 eine Reduktion des C-Faser-Preises bis auf 10 €/kg auf. Dem Graphen ist die Preisentwicklung der STS 40 (Toho Tenax) ab 2000 bis 2012 beigefügt. Die Realität kann somit die Prognosen BURGs nahezu bestätigen. Es ist aber eher unwahrscheinlich, dass dieses Preisniveau noch weiter unterschritten wird, da das Ausgangsmaterial der C-Faser, das PAN, ölpreisgesteuert tendenziell im Preis steigen wird. Die Möglichkeit der Produzenten liegt somit in einer effizienten und somit kostenoptimierten Herstellung. Die Prognosen BURGs decken sich auch mit denen von SCHLARB [Sca 07], vgl. Abbildung 78 b, Anhang Kapitel 9.

Die Preisanpassung, so nahm SCHLARB an, ist eine Funktion der kumulierten Produktionsmenge. In seiner Darstellung ging er davon aus, dass beginnend mit dem Jahr 1970 sich alle 20 Jahre die produzierte Menge verzehnfacht. Das prognostizierte Niveau unter 10 €/kg konnte sich jedoch nicht einstellen.

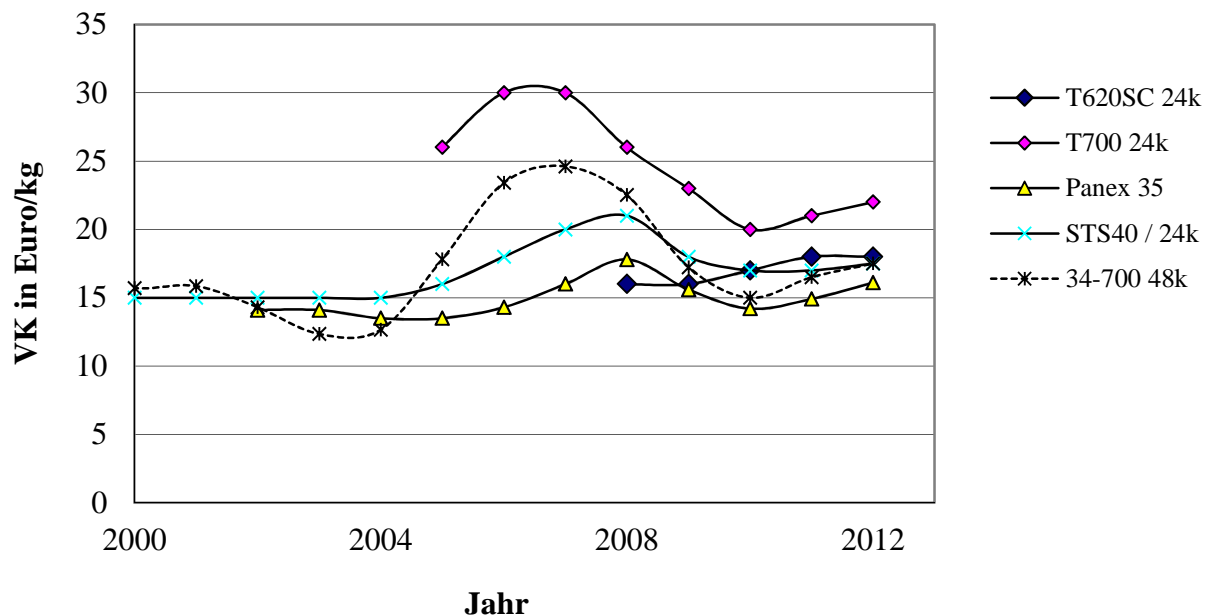


Abbildung 4: Preisentwicklung der C-Faser nach Produzenten und Jahren [TMa 11]

Die Abbildung 4 zeigt die Preisentwicklung der Carbon-Faser für die Jahre 2000 bis 2012, separiert nach Produzenten. Die Type T700 von Toray ist eine gern für den Luftfahrzeugbereich verwendete Faser und liegt somit im Preis über dem Niveau der restlichen aufgeführten Mitwettbewerber. Aber die Prognosen der verschiedenen Faserhersteller weisen auch einen einheitlichen Preistrend für die nächsten Jahre auf. Mittelfristig sollte somit nicht mit einer markanten Verteuerung der Carbon-Faser zu rechnen sein. Ein Preisniveau unter 15 €/kg für 24 bis 48k HT-Faser ist tendenziell für die Zukunft eher nicht zu erwarten.

3.1 Abhängigkeit vom Rohöl

Die Kosten der Kohlenstofffaser-Herstellung werden im Wesentlichen vom Ausgangsmaterial, dem Precursor (PAN) selbst sowie den Herstellkosten, also der Umwandlung zur eigentlichen Kohlenstofffaser, geprägt. Zur Herstellung eines Kilogramms Kohlenstofffaser werden etwa zwei Kilogramm Precursor benötigt. Die Preisentwicklung vom Acrylnitril, aufgezeichnet über drei Jahre zeigt, vgl. Abbildung 79, Anhang Kapitel 9, dass eine direkte Abhängigkeit zum Rohölpreis vorliegt. Die Technologie der Herstellung von Kohlenstofffasern basierend auf der PAN-Technologie ist auf das Jahr 1959 zurückzuführen. Ein Team, geführt von SHINDO [Heh 86] am Industrial Research Institute in Osaka, war das erste, das aus PAN-Material Kohlenstofffasern produzierte. Für das Herstellungsverfahren sind Temperaturen zwischen 1.300 und 2.500 °C notwendig, vgl. die Prozessstufen in Abbildung 81, Anhang Kapitel 9. In der Stabilisierungsstufe reagiert das thermoplastische Polyacrylnitril in einer oxidierenden Umgebung. Dabei erfolgt neben der Abspaltung von Wasserstoff eine Vororientierung des Moleküls zu einem sogenannten Leiterpolymer, aus dem durch Ringschluss (Zyklisierung) eine Kette von Pyridin-Sechsringen entsteht. Die so erhaltene Faser ist unschmelzbar, was die Voraussetzung für die nachfolgende Carbonisierung darstellt.

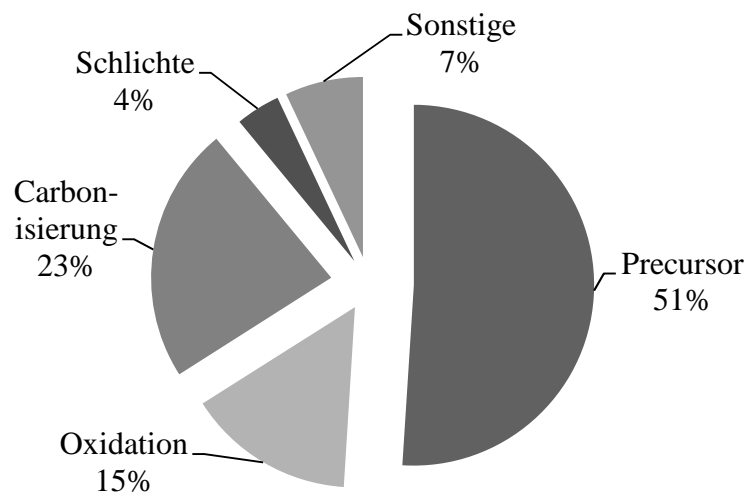


Abbildung 5: Aktuelle Produktionskosten der PAN-Faser [USD 10]

Abbildung 5 zeigt die aktuellen Produktionskosten zur Herstellung von PAN-Kohlenstofffasern [Tao 12], [USD 10]. Unter **Sonstige** fallen zum Beispiel Kosten für den Spulenträger. Von den absoluten Kosten entfallen somit nur 51 % auf den Precursor.

3.2 Preisentwicklung von Stahl

Sich ständig abzeichnende Preiserhöhungen für die Basisrohstoffe Eisenerz und Kokskohle sowie ein angekündigtes kurzfristigeres Preissystem stellen eine beachtliche Belastung für die Stahlkonjunktur dar. Die Rohstoffproduzenten haben aufgrund ihrer Größe eine gewaltige Marktmacht erlangt, der selbst die größten Stahlunternehmen kaum etwas entgegenzusetzen haben. Wie groß ihre dominante Marktposition ist, zeigt sich auch daran, dass die weltweit drei größten Bergbaukonzerne sogar im Krisenjahr 2009 ihre Umsatzrenditen auf circa 27 % steigern konnten. Drei große Gesellschaften – die brasilianische VALE (früher CVRD) als Nummer eins mit einem Marktanteil von rund 33 %, die australisch-britische RIO TINTO als Nummer zwei mit 19 % und die australische BHP BILLITON mit 17 % – beherrschen schon jetzt mehr als zwei

Drittel des überseeischen Eisenerzhandels [Keh 09]. Die Stahlunternehmen in Deutschland sind ausschließlich auf den Import von Eisenerz angewiesen. Über die Hälfte der Einfuhren stammt aus Brasilien. Auch bei der Koks-kohle ist eine deutliche Preissteigerung zu erwarten [Keh 09]. Vergleiche die Veränderung der Rohstoffkosten, Abbildung 82 im Anhang unter Kapitel 9.

3.3 Preisentwicklung von Kohlenstofffaser im Vergleich zu Stahl

Die Erhöhung der Basisrohstoffe schlägt sich unmittelbar auf den Verkaufspreis nieder. Es zeigt sich aber, dass Stahl einer stärkeren Teuerungsrate unterliegt, als die untersuchte HT-Faser, vgl. hierzu Abbildung 6. Der Peak beim Stahl zwischen den Jahren 2008 und 2009 ist dem hohen Bedarf, besonders der Nachfrage aus China, geschuldet. Nach einer längeren Phase auf gemäßigttem Preisniveau begann der Rohölpreis bereits im Jahr 2002 merklich anzusteigen und legte dann schubweise an Tempo zu. Im Jahr 2008 spitzte sich der Anstieg der Ölpreise derart zu, dass im Juli des Jahres ein Rekordhoch erreicht wurde. Im Vergleich zum Stahl passten die Produzenten von Kohlenstofffasern ihre Kapazitäten an, vgl. Abbildung 80 im Anhang Kapitel 9, sodass beginnend mit 2008 die Schere zwischen Kapazität und Nachfrage sich zu öffnen begann, was die Produzenten mit einer kurzfristigen Preisreduktion beantworteten. Zu den Kosten der Herstellung von Kohlenstofffasern (24k, 48k) stellte ROBERTS [Rot 08] folgende vergleichende Rechnung auf: Zwischen 2001 und 2006 erhöhte sich der Dollar-PAN-Preis um 19 %. Die Umwandlung des Ausgangsmaterials (PAN) in das Endprodukt C-Faser erhöhte sich, trotz steigender Energiekosten, nur um 5 %. Dies zeigt, wie der Herstellungsprozess durch eine steigende Absatzmenge sich in den Kosten optimiert anpassen konnte. Obwohl in China in den nächsten Jahren nur vergleichsweise wenig C-Faser produziert wird, steigt der Verbrauch dort stark an. Es kann davon ausgegangen werden [Rot 08], dass der Schwerpunkt der weltweiten C-Faserproduktion in Europa und Nordamerika bleibt, der Anteil der Gesamtmenge aus Japan jedoch rückläufig sein wird.

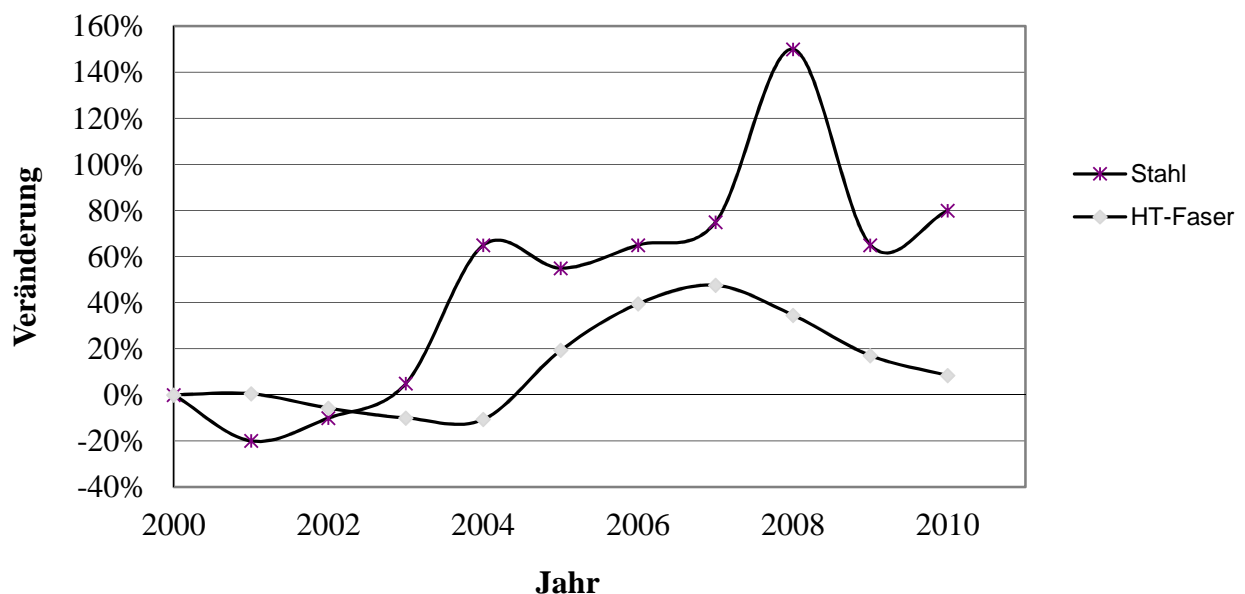


Abbildung 6: Veränderung der Rohstoffkosten im Vergleich über 10 Jahre [TMa 11]

3.4 Automatisierung

Im Jahre 1745 erfand der englische Schmied E. LEE eine Vorrichtung, die es Windmühlen erlaubte, sich selbstständig in den Wind zu drehen. 1787 setzte der Geistliche E. CARTWRIGHT erstmals einen vollmechanisierten Webstuhl ein. Eine neue Dimension erreichte die Automatisierung mit dem beginnenden Industriezeitalter im 19. Jahrhundert, deren Geburtsstunde mit der Erfindung der Dampfmaschine schlug. In Zusammenhang mit dieser Erfindung wird vom Beginn der industriellen Revolution gesprochen. Zu den technologieintensivsten Branchen gehört der Maschinenbau. Optimale Technologien und Wettbewerbsfähigkeit gehören fest zueinander. Der Maschinenbau als weltweit erfolgreiche und technologisch führende Branche in Deutschland ist vor allem durch mittelständische Unternehmen geprägt. Viele Unternehmen im Bereich Maschinenbau treten als Zulieferer für größere Maschinen- und Anlagenbauer auf. Es ist zum Beispiel so, dass Unternehmen der Automatisierungstechnik Kunden in praktisch allen industriellen Bereichen bedienen. In SIMONs [Sih 07] erstelltem Ranking über die Merkmale von Marktführern wurden die Technologie-, die Qualitätsführerschaft und der Bekanntheitsgrad genannt. Technologieführerschaft definiert den Beherrschungsgrad der technischen Produktionsprozesse und deren Abläufe. Dies geht einher mit einem Vorsprung in der Entwicklung und Produktionstechnik. Im Unterschied zum Innovationsführer, der sich auf die Entwicklung neuer Produkte fokussiert, verfolgen Technologieführer jedoch das Ziel der bestmöglichen Produktherstellung. Mit der Führung in Qualität soll eine klare Trennung zum Wettbewerb geschaffen werden. Automatisierte Prozesse haben somit das Potenzial, die Qualität des hergestellten Produktes signifikant zu verbessern. In einem Untersuchungsbericht zum Forschungs- und Handlungsbedarf [BHS 08] wurde eine Befragung ausgewiesen, in der 96,9% der Befragten, alles ausgewiesene FKV-Experten, eine steigende Nachfrage an Composite-Produkten prognostizierten. Als die größte Herausforderung bei der Serienfertigung, die einen wesentlichen Einfluss auf eine erfolgreiche Produktion bei FKV-Bauteilen hat, wurde mit 61,9% die Automatisierung genannt. Die Bearbeitung von FKV ist bis dato ebenso eine nicht umfassend gelöste Aufgabe bei der Umsetzung von Serienprozessen. Als Ergebnis der Erhebung sind vier vordringliche Handlungsfelder abgeleitet worden:

- angepasste Abwicklungssysteme
- erweiterte Trenn- und Fügeverfahren
- prozessintegrative Qualitätssicherungsverfahren sowie
- Optimierung der Herstellungsprozesse für endlosfaserverstärkte Verbundbauteile.

Die Gründe für eine Automatisierung des Produktionsprozesses sind vielfältig. An erster Stelle steht jedoch die Reduzierung der Herstellkosten, gefolgt von der Erhöhung der Prozesssicherheit, um somit eine Homogenisierung der Produktqualität zu erreichen. Automatisierung bedeutet auch eine Erhöhung der Durchsatzleistung, welche sich wiederum auf die Kosten auswirkt. Die Entlastung des Menschen von schwerer körperlicher oder eintöniger Arbeit ist ebenso notwendig. Der Arbeitskostenvorteil internationaler Wettbewerber wird sich auf absehbare Zeit nicht nennenswert verändern. Zwar sind in Deutschland und Japan die jährlichen Zuwachsraten mit 2,0 und 1,5% [Scs 05] absolut am geringsten, jedoch die Größe der Lohnkosten im internationalen Ranking mit am höchsten. Die industriellen Arbeitskosten je Stunde haben sich in Deutschland von 2000 bis 2008 im Jahresschnitt moderat um 2,3% erhöht, international war der Zuwachs nur in Japan und der Schweiz geringer. Im Jahr 2008 lagen die Arbeitskosten in der westdeutschen Industrie immer noch um 31% über dem durchschnittlichen Niveau der fortgeschrittenen Volkswirtschaften. Die Lohnkostenstruktur in Deutschland zwingt somit einen hohen Automatisierungsgrad auf. Dadurch wird nicht allein die Wettbewerbsfähigkeit des Produktionsstandorts Deutschland, sondern auch der jetzt schon hohe Exportanteil bei Branchenprodukten zunehmen. Der Fokus der deutschen Industrie ist auf eine energie- und kosteneffiziente

Produktion, die sich durch hohe Qualitäts-, Sicherheits- und Umweltstandards auszeichnet, ausgerichtet. Mit Ausnahme der Lebensmittel-, Verpackungs- und Pharmaindustrie ist aber bei Firmen mit weniger als 50 Arbeitern [Mau 10] keine Roboterdichte zu verzeichnen. Zur ökonomischen Herstellung von Mehrschichtverbunden mit definiertem Anforderungsprofil hat sich im Wesentlichen die Wickeltechnik durchgesetzt [Krl 92]. Mit dem weitgehend automatisierten Filament-Winding-Verfahren kann eine hohe Reproduzierbarkeit sämtlicher Prozessdaten erreicht werden [Krl 92]. Das Filament-Winding-Verfahren, umgangssprachlich auch Wickeltechnik genannt, wurde zur Herstellung von rotationssymmetrischen Bauteilen konzipiert [Maa 10]. Erste Ansätze hierfür finden sich gegen Ende der vierziger Jahre des letzten Jahrhunderts in USA und Kanada wieder. Die ersten Maschinen waren in ihren Achsen fest verbunden, die Freiheitsgrade der Laminatherstellung folglich sehr gering. In den 1960er Jahren wurden die ersten Maschinen durch McClean-Anderson in den Markt gebracht, in Europa kann die Firma Bolenz & Schäfer genannt werden. Durch den Einsatz von Einzelmotoren je Achse sowie die Verwendung von CNC-Steuerungen können auch komplexe Laminataufbauten realisiert werden. Der Wickelprozess als solches ist bereits hoch automatisiert. Kaum ein anderes Verfahren zur Verarbeitung von Endlosfasern bietet hier mehr Potenzial. Für eine strategische Einschätzung der Stärken und Schwächen wie auch Chancen und Risiken in Bezug auf einen automatisierten Einsatz moderner faserverstärkter Hochleistungswerkstoffe führte [BHS 08] folgende SWOT-Analyse durch, siehe Tabelle 2.

Tabelle 2: SWOT-Analyse [BHS 08]

<p><u>STÄRKEN</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Hohes Leichtbaupotenzial • Große Gestaltungsfreiheit • Hervorragende spezifische Eigenschaften • Gute Dämpfungseigenschaften • Gute Schwingfestigkeit • Image: Hohe Innovationskraft 	<p><u>CHANCEN</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung und Marktrealisierung wettbewerbsdominierender Produkte hohen Leichtbaugrades • Wissens- und Technologievorsprung • Wirtschaftliches Wachstum, Schaffung von hochwertigen Arbeitsplätzen • Eröffnung breiter Einsatzszenarien auch für nachwachsende Rohstoffe
<p><u>SCHWÄCHEN</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Materialkosten, Prozesskosten • Aufwendige Recyclingverfahren • Anisotropes Werkstoffverhalten erfordert spezielles Know-how • Komplexe Versagensmechanismen • Aufwendige Qualitätssicherung 	<p><u>RISIKEN</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Verfügbarkeit der Rohstoffe und Halbzeuge • Nicht verkettete Fertigungsabläufe • Fehlende Reparaturkonzepte • Integrationsfähigkeit in bestehende Strukturen und Prozesse • Struktur- und Prozesssimulation

Zitat: „Einer breiten Einführung in die industrielle Serienanwendung dieser Werkstoffklasse stehen jedoch, neben den bekannten Hemmnissen im Bereich der Ausgangsmaterialkosten, vor allem derzeit noch ungelöste fertigungstechnische Fragestellungen im Wege. Nur durch eine gezielte Neu- und Weiterentwicklung effizienter flexibler Verarbeitungstechnologien, Werkzeugsysteme sowie zugehöriger Bearbeitungs- und Abwicklungsverfahren können Fertigungsprozessketten hoher Wertschöpfung bei der Herstellung von Hightech-Produkten nachhaltig in Deutschland verankert und weiter ausgebaut werden“ [BHS 08].

4 Selektion des Untersuchungsgegenstandes

4.1 Typenauswahl für die Untersuchung

Die Analyse in Abbildung 7 zeigt die Verteilung von Walzentypen europäischer Hersteller nach Stückzahl und Masse. Bei der Masse sei anzumerken, dass nur der FKV als solches dargestellt ist, die Grafik ist um metallische Elemente, z. B. die Beschichtung, bereinigt. Die Bereiche **Folie 1** bis **Folie 3** unterscheiden sich nach Funktion und somit Dimension der Walzen. **Folie 1** beispielsweise wird verwendet bei Blas- und Flachfolienextrusion für die Bahnführung, die Geometrie ist klein, die Stückzahlen sind groß. **Folie 2** findet Verwendung bei BIAx-Anlagen. In der Regel sind diese über 6,5 Meter lang. **Folie 3** wird in der Aufrollung oder beim Schneiden der Bahnware eingesetzt. **LCD** findet Verwendung bei der Herstellung der LCD-Monitore. Das Bedrucken von flexiblen Verpackungen ist die Arbeitsumgebung von **Flexodruck**.

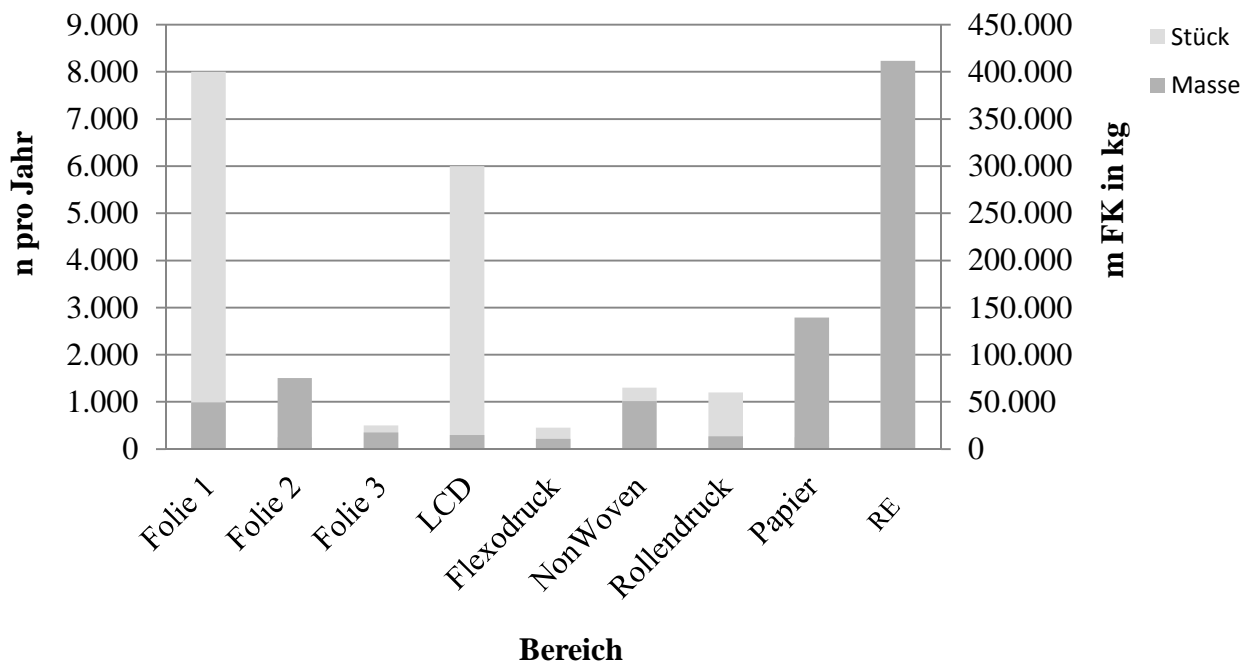


Abbildung 7: Zusammensetzung des europäischen Producer Market [TMa 11]

Der Bereich **NonWoven** wurde nicht weiter separiert, Schwerpunkte der Walzensysteme sind Bahnführungselemente oder die sogenannten Arbeiter- und Wenderwalzen. Die zahlenmäßig gering verwendeten „Turbounits“ wurden nicht einzeln aufgeschlüsselt. Im **Rollendruck** hat es die CFK-Technik ermöglicht, die Arbeitsbreite als auch die Geschwindigkeit, somit die Produktivität zu steigern. Die größten Walzendimensionen werden unter **Papier** produziert. Hier werden zum Teil auch FK-Rohre mit einer Masse über 2,5 Tonnen für die Herstellung der Walzen verbaut. Die Stückzahlen sind jedoch gering. Der größte Bereich ist **RE** (im Untersuchungszeitraum). In diesem Segment werden u. a. dickwandige FKV-Torsos zur Herstellung benötigt. Es ist davon auszugehen, dass diese Branche vor einem nächsten großen Wachstumsschritt steht [VEN 10] und der Bedarf an diesen Maschinenbauteilen weiter steigen wird.

Die Summe der in Abbildung 7 gezeigten Produkte geht ins außereuropäische Ausland. Von allen verglichenen Systemen weist **RE** den höchsten technischen Anspruch in der Herstellung auf. **RE**

zeigt markant parallele technische Merkmale zur Walze auf, vgl. hierzu Abbildung 10 und Abbildung 11. Es handelt sich in diesem Fall um ein Walzenpaar zum Trennläppen von Werkstücken oder Rohlingen, vgl. Abbildung 11, [Hct 12], [log 12]. Hierbei wird für den Trennvorgang ein dünner Sägedraht eingesetzt, welcher in Rillen geführt mit hoher Geschwindigkeit um die Walzenpaarung läuft, um die er in der Regel tausendfach gewickelt ist. Durch die Drahtwicklung entsteht eine Art Gatter aus parallel angeordneten Drahtabschnitten, durch welches das Werkstück unter Zufuhr eines Läppmittels geführt wird. Die Wechselwirkung von Draht und Läppmittel verursacht den eigentlichen Zerspanungsprozess. Das Drahtgatter erzeugt nach dem Verlassen (Schnitt) eine Vielzahl von dünnen Scheiben, siehe Abbildung 8b. Es eignet sich daher besonders für große Stückzahlen dünner Scheiben, die mit hoher die Präzision hergestellt werden müssen. Es bleibt anzumerken, dass diese Technologie mit enormen Schnittverlusten verbunden ist.

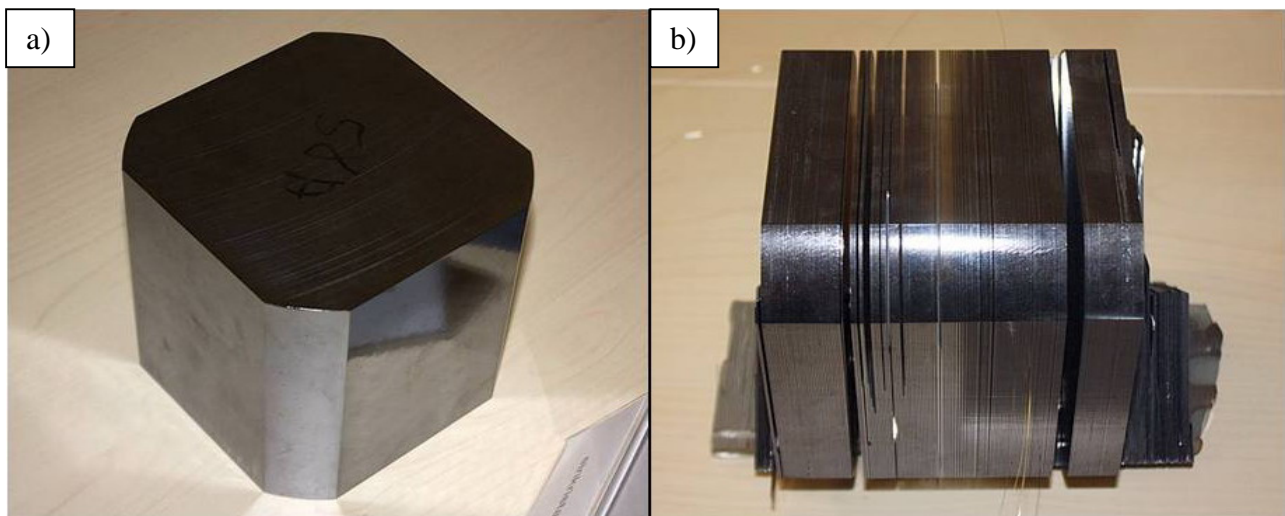


Abbildung 8: Monokristalliner Ingot [Sev 10], a) Block vor dem Schnitt, b) nach dem Schnitt

Das Silizium-Grundmaterial kostet ca. 50 €/kg, der Schnittwirkungsgrad liegt aber bei nur ca. 50%. Abbildung 8a und b zeigt den Rohstoff vor und nach dem Schnitt. Die zu untersuchende Type findet sich im Arbeitsbereich „Herstellung von Ingots und Wafern“ wieder. Für die nachfolgende Untersuchung wird daher exemplarisch das Segment **RE** herangezogen. Das Drahtträgersystem (Walze) ist komplex aufgebaut und mit hohen dynamischen Anforderungen versehen. Aufgrund des hohen Gesamtdrahtzuges und der verwendeten Lagerart ist es notwendig, jede Walze axial zu verspannen. Bei der untersuchten Type werden 100 kN angelegt, welche über das Krafteinleitungselement (KEEL) in die Faserverbundschale übertragen werden muss. Zur Auslegung wurde eine Reserve von 50% angelegt, was in Summe einer Kraft von 150 kN entspricht.

Faserverbundbauteile für den Bereich Regenerative Energien (**RE**), auch typenähnlich zum Untersuchungsgegenstand, sind im europäischen Bereich von mehreren Produzenten bekannt, vgl. [GAR 11], [HSA 10], [XPE 11].

4.2 Belastung und Geometrie

Der Untersuchungsgegenstand ist frei gewählt und geometrisch wie folgt in Tabelle 3 definiert:

Tabelle 3: Frei definierte Geometriedefinition der untersuchten Type

Bezeichnung	Maß
Innendurchmesser FK	235 mm
Innendurchmesser PUR	340 mm
Außendurchmesser	360 mm
Länge WOB	1.150 mm
Länge FK	1.120 mm
Wandstärke FK	52 mm
Breite Deckscheibe	15 mm
Innendurchmesser Deckscheibe	270 mm
Gewicht PUR	15 kg
Gewicht FKV	82 kg
Gewicht Inlays	84 kg

Ein typisches Belastungsbild, hervorgerufen durch die Einspannung und das aufgezogene Drahtfeld, vgl. ähnlich EP08 08701A2 in Funktion und Geometrie sowie Abbildung 11, wird wie folgt in Tabelle 4 angegeben:

Tabelle 4: Typisches Belastungsbild der Untersuchungstype

Belastung	Wert
Anzahl der Drähte pro Walze	3.000
Drahtzug	22 N/Draht
Gesamter Drahtfeldzug (Ober- und Unterzug)	132 kN
Drahtdurchmesser	0,12 bis 0,16 mm
Umschlingungswinkel	180°
Drahtgeschwindigkeit ¹	23 m/sec
Axiale Einspannkraft (F_a) ²	150 kN
Walzendrehzahl	max. 1.200 rpt
Umgebungstemperatur	20 bis 70 °C
Kühl- und Schneidmittel	PEG mit SIC

Typische Toleranzen für derartige Systeme, die sich bei der Montage ergeben, sind in Tabelle 5 enthalten:

Die Belastungsdaten sind identisch oder ähnlich aus folgenden Quellen entnommen: [Rek 11], [Kom 10], [POS 11].

¹Die Drahtgeschwindigkeit findet in der Literatur Bandbreiten von 5 bis 15 m/s, in einigen Quellen, vgl. [SIN 12], sogar bis 20 m/s, für den Untersuchungsgegenstand wurde frei 23 m/s gewählt. ²Die axiale Verspannung ist aus dem Patent JP10 086143 A bekannt, die Vorspannkraft ist mit 100 kN plus 50 % Sicherheit frei gewählt und keiner bekannten Bauform entnommen.

Tabelle 5: Typische Toleranzen der Untersuchungstypen

Art	Toleranz
Gesamtlänge	$\pm 0,3 \text{ mm}$
Außendurchmesser	$\pm 0,15 \text{ mm}$
E_x Modul	$\pm 3 \text{ GPa}$

Somit ergibt sich der folgende Belastungszustand für den Untersuchungsgegenstand, der in Abbildung 9 zu sehen ist:

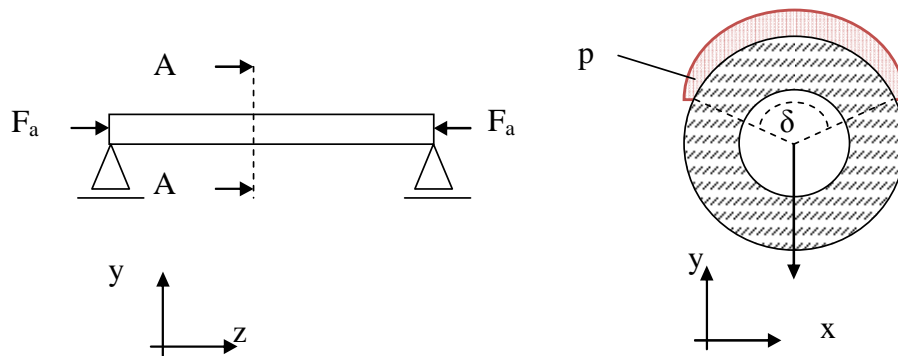


Abbildung 9: Belastungszustand der DTS

Der frei gewählte Untersuchungsgegenstand folgt den in Abbildung 10 angegebenen Geometriedaten, die Keels sind von innengelagerten Bahnführungswalzen ausgeliehn, die starke CFK-Wandstärke der von hochbelasteten Querschneidern.

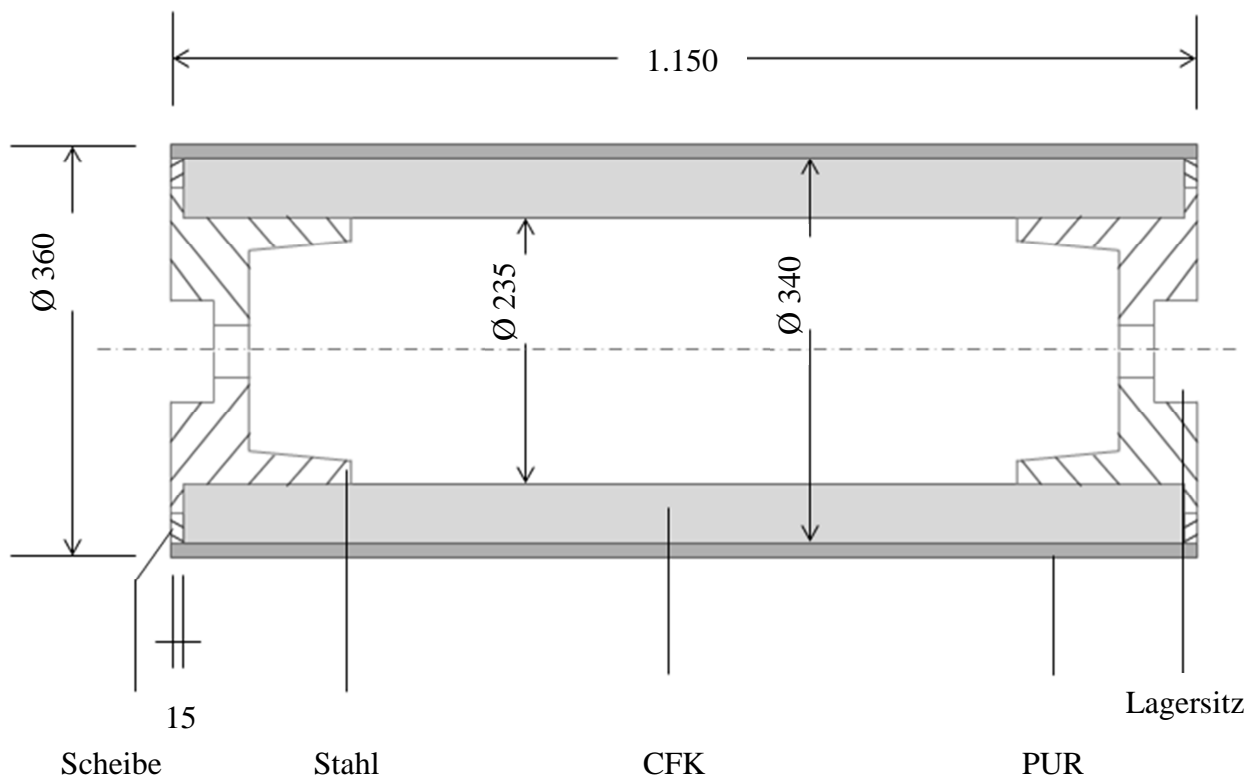


Abbildung 10: Untersuchungsgegenstand mit Geometrie und Materialkennzeichnungen

Der Untersuchungsgegenstand ist aus einer Vielzahl von Detail-Patenten bekannt, exemplarisch sei die DE10 2007 019566 A1 genannt. Die in Abbildung 10 gezeigte Konstruktion ist typisch, jedoch frei gewählt und nicht einer speziell bekannten Baureihe ausgeliehen.

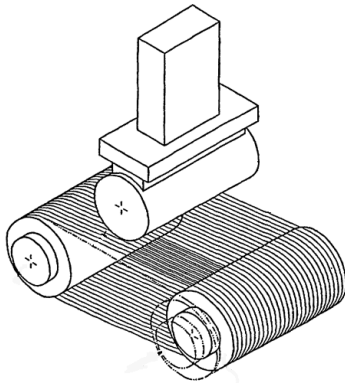


Abbildung 11 zeigt den Untersuchungsgegenstand in der Paarung mit der zweiten DTS sowie aufgespanntem Drahtfeld mit angedeutetem Durchbiegungsverlauf. Eine ähnliche Wandstärke wie auch die Anordnung von achsenparallelen CFK-Walzen sind aus dem Bereich Querschneider für Papier und Pappe bekannt, vgl. EP09 95560 B1, EP09 60702 A2.

Abbildung 11: DTS im Einsatz (EP08 08701A2)

Monitoring von Drahtträgersystemen

Faserverbundwalzen, insbesondere mehrdimensional belastete, zeigen oftmals Schwächen in der Krafteinleitung von Metall in die Faserverbundschale sowie in den Grenzschichten. Bei technischen Anwendungen von MSV-Schalen führt die Schichtanisotropie zu einer starken Verformungsbehinderung der oft dünnen Einzellagen gegeneinander, was an den Schichtgrenzen hohe Spannungsunstetigkeiten hervorrufen kann [Krl 05]. Durch Wärmeeinwirkung und Mediendiffusion werden insbesondere bei polymeren Faserverbunden bereits im Herstellungsprozess inhomogene Eigenspannungen induziert [ETH 10], [Fio 03], vgl. hierzu Kapitel 4.4. Diese erzeugen zusätzliche unerwünschte Verformungen und können vereinzelt auch das Versagen der gesamten Faserverbundstruktur herbeiführen [Krl 05]. Die untersuchte Type unterliegt beiden Extremen. Durch die zwangsweise integrative Verwendung verschiedener Materialien in Kombination mit erheblichen Steifigkeitssprüngen existieren definierte Versagensstellen. Da der designierte Verwendungszweck beim Ausfall des Walzensystems einen erheblichen Kollateralschaden verursachen kann, sind für die breite Verwendung des Untersuchungsgegenstandes Frühwarnerkennungssysteme notwendig. Hierbei sind zwei Extreme denkbar und nach heutigem technischem Stand auch umsetzbar.

Die Minimalversion würde besondere Schwachstellen überwachen, zum Beispiel den festen Sitz der Krafteinleitung, oder mithilfe von Schwingungsaufnehmern die Vibrationen des Systems kontrollieren. In der Maximalversion würde das System den kompletten Lifecycle erfassen, dadurch beschrieben, dass Einsatzzeiten, Geschwindigkeiten, Temperatur des Kühlmediums bis hin zum Wiederbeschichten überwacht werden. Zum einen würde das System die Betriebsdaten speichern, sodass der Betreiber in die Möglichkeit versetzt wird, eine Optimierung an der Betriebsweise vorzunehmen. Zum anderen würde das System das Entstehen von Schädigungen oder Störungen der Maschine melden, die Logik würde folglich die Anlage ausschussfrei zum Stehen bringen. Aus der DE10 2006 035274A ist bekannt, dass überwachende Sensoren den Belastungszustand im Bauteil sogar zwischen dessen Faserverbundlagen beim Laminieren oder Verpressen mithilfe von mindestens einem Sensor, einer Energieversorgung und einer Signalverarbeitung überwachen können, welche vollständig integrierbar sind [LE 10]. Ferner ist von PFEIFER, LANDGRAF, FOLPRECHT, STARKE ein integriertes Sensornetzwerk aus dem Teilprojekt im SFB 639 bekannt [IAS 04]. Auch beschrieben ist die Integration eines Sensornetzwerkes in sicherheitsrelevanten textilverstärkten Bauteilen aus Glasfaser-Polypropylen-Verbunden, wobei eine integrierte Antenne für eine drahtlose Datenübertragung sorgen kann. Für

die Laufzeiterhöhung der eingebauten Stromquelle ist ein piezoelektrischer Aktivierungssensor implementiert, der die Elektronik im Ereignisfall aus einem nahezu energielosen Zustand in den Einschaltzustand aktiviert.

In den letzten Jahren wurde ein Fokus auf die Weiterentwicklung von intelligenten Faserverbundmaterialien gelegt, welche zusammen mit der Informationstechnik im Faserverbundbauteil integriert wurden. So sind Dehnungsmessungen mithilfe des Faser-Bragg-Gitters am Holmgurt eines Segelflugzeuges der Akaflieg Braunschweig im Flugversuch untersucht worden [Brm 03]. Hierbei wird mithilfe von Fasern mit einem Licht leitenden Kern über Brechzahlunterschiede bei Dehnung oder Stauchung die Bewegung interpretierbar. Die Integration von Informationstechnik in Faserverbundmaterialien wie Sensorik und Aktorik führt zu komplexen funktionsorientierten Systemen [KHE 09]. Für diesen Zweck stehen diverse Materialien, zum Beispiel piezoelektrische, faseroptische Leitungen oder auch Formgedächtnislegierungen wie auch vorgefertigte Informationselemente (zum Beispiel Dehnungsmessstreifen), zur Verfügung [KHE 09]. Daraus können dann aktive Verbundwerkstoffe bzw. „Smart-Composites“ mit gezielten Eigenschaften, die besonders für den Einsatz in beanspruchten Bauteilen aus Faserverbundwerkstoffen geeignet sind, entstehen. Als Beispiel sollen die Flügel von Windkraftanlagen genannt werden. Mithilfe von Stricksensoren, zum Beispiel auf einem technischen Vlies appliziert [Elh 10], können Dehnungen erkannt werden. Diese Trägermaterialien lassen eine gute Anbindung des Sensors an die verwendete Matrix zu [Zoh 10]. Der Messaufnehmer wird somit integrativ im Bauteil verarbeitet. Alternativ kann auch ein DMS einfach auf die Struktur aufgeklebt werden [Mud 00].

4.3 Verwendete Rohstoffe

Der Laminataufbau für die Versuche, vgl. Tabelle 21, Anhang Kapitel 9, stellt aufgrund der hohen Wandstärke eine Besonderheit im Herstellungsprozess dar. Auf dem konventionellen Herstellungsweg muss das Laminat in zwei FW-Prozessen unterteilt hergestellt werden. Hauptsächlich Grund hierfür ist der Sachverhalt, dass die Prozessparameter beim Filament-Winding-Verfahren in Funktion der Herstellungszeit sich verfahrenstechnisch verändern. Verwendet wurde ein typischer Aufbau für dickwandige FW-Lamine [TMa 09], [MKe 08], auch bekannt bei siebspannenden Walzen [INO 12] oder bei Querschneidern, vgl. EP09 95560 A2. Hierzu wurden folgende Rohstoffe im Vorfeld untersucht:

4.3.1 Fasern

Für die Untersuchung wurden aus Produktivitätsgründen nur Heavy-Tow-Fasern zwischen 48k und 60k gewählt werden, daher sind folgende Typen verwendet worden:

Grafil 34/600WD

Es handelt sich hierbei um eine doppelt gelegte 24k-Type. Die Bezeichnung WD zielt auf die sehr flache Querschnittsform ab. Der Sizinggehalt wurde vom Hersteller mit 1,4% angegeben. Die untersuchte Faser wurde mit dem Precursor von Mitsubishi Chemical im Produktionswerk der SGL Carbon Fibres Ltd in Muir of Ord / Schottland hergestellt, vgl. technische Daten in Tabelle 6.

SGL C30 T050 EPY

SGL Carbon benutzte bei der untersuchten Menge den EPG-Precursor der Firma Lenzing AG (European Precursor GmbH), vgl. Information im Anhang unter Kapitel 9. Der Sizinggehalt wurde vom Hersteller mit 1 % angegeben. Bei den verwendeten C30-Fasern wurde ein unerwartet erhöhter Sizinganteil, zumindest spulenweise, beobachtet. Nach Rücksprache mit dem Hersteller wurde dies auch bestätigt. Es ist zu vermuten, dass dieser Sachverhalt Einfluss auf die Untersuchung genommen hat, vgl. technische Daten in Tabelle 6.

Tabelle 6: Mechanische Daten: Grafil 34/600WD // SGL C30 T050 EPY

Type	Filament	Festigkeit	E-Modul	Dichte	Tex	Dehnung	Filament-Ø
		[MPa]	[GPa]	[kg/dm ³]	[mg/m]	[%]	[µm]
Grafil	48.000	4.500	234	1,8	3.200	1,9	7
SGL	50.000	4.000	240	1,8	3.300	1,7	7

Beide Fasertypen werden durch sogenanntes Doppeln erzeugt, was bedeutet, dass zwei 24k-Typen zusammengefasst werden.

Verwendete Ingenieurskonstanten

Die Tabelle 7 zeigt die Ingenieurskonstanten, welche für die Laminatberechnung, vgl. Tabelle 21, zugrunde gelegt worden sind.

Tabelle 7: Berechnete Laminatwerte aus dem Wickelaufbau

E _x -Modul	E _y -Modul	G _{xy} -Modul	α _x -Laminat	α _y -Laminat
[GPa]	[GPa]	[GPa]	[10 ⁻⁶ /K]	[10 ⁻⁶ /K]
88,67	25,18	10,92	0,20	7,42

Für das Laminat wurde ein Faservolumengehalt von 52 % definiert. Vergleiche hierzu die UD-Materialkennwerte in Tabelle 20 im Anhang Kapitel 9. Die Volumenschwindung durch den dickwandigen Lagenaufbau sowie durch das zweimalige Tempern wurde mit 6 % angenommen.

AST-Layer

Als AST-Layer werden umgangssprachlich Oberflächen bezeichnet, welche die technischen Notwendigkeiten der zu applizierenden Oberfläche zur Verfügung stellen. In der Regel handelt es sich hierbei um wenige Millimeter starke Interfacelayer, die auf dem Grundkörper als auch als Beschichtung ausreichend gut haften. Diese Lagen vermitteln auch zwischen den verschiedenen Wärmeausdehnungskoeffizienten der beiden Partner. In der konventionellen Herstellungsmethodik wurde ein Glasgewebe der GTS-Serie verwendet.

Abreißgewebe

Zum Fixieren der Lagen wurde das Material STYLE1818 mit einem Flächengewicht von 90 g/m² der Firma Schlösser & Cramer KG mit einer Breite von 100 mm benutzt [SKA 12].

4.3.2 Matrix-System

System A

Als Matrixsystem wurde ein anhydritisches **System A** verwendet. Als Beschleunigeranteil wurde ein Gewichtsanteil eingearbeitet. Das System ist ein lösungsmittelfreies Standard-Epoxydsystem auf Bisphenol-A-Basis in Verbindung mit einem Anhydrid-Härter und niederviskose. Mithilfe eines Beschleunigers wird das System zeitlich eingestellt. Das aufgeführte Laminiersystem weist für den Filament-Winding-Prozess gute Bedingungen auf. Bereits ab 40 °C werden Verarbeitungsviskositäten von unter 200 mPas erreicht, vgl. Abbildung 12. Mit einer Topfzeit (Potlife) von vier bis fünf Stunden ist das System für den vorgesehenen Untersuchungsgegenstand verwendbar. Von der Arbeitssicherheit sind außer den grundlegenden Maßnahmen keine weiteren Aktionen notwendig.

System B

Für das **System B** wurde ein Harz/Härter-Gemisch von zwei unterschiedlichen Produzenten untersucht, vgl. auch [TMa 09]. Hierbei handelt es sich um eine aminisch härtende Reaktionsmasse mit hoher Temperaturstabilität.

Type	E-Modul	Viskosität	Potlife	Wärmeausdehnung (α)	T _G
	[GPa]	[mPas]/50°C	[min]/40°C	[10 ⁻⁶ /K]	[°C]
System A	3,2	125	240-300	56	151
System B	2,6	162	515	69	146

Tabelle 8: Kennwerte des Matrix-Systems: System A // System B

Diese Systeme sind ätzend und auch sonst als gefährliche Chemikalien einzustufen. Die Tabelle 8 zeigt eine Übersicht der Systeme, weiterhin sind die Viskositäten in Abbildung 12 grafisch dargestellt.

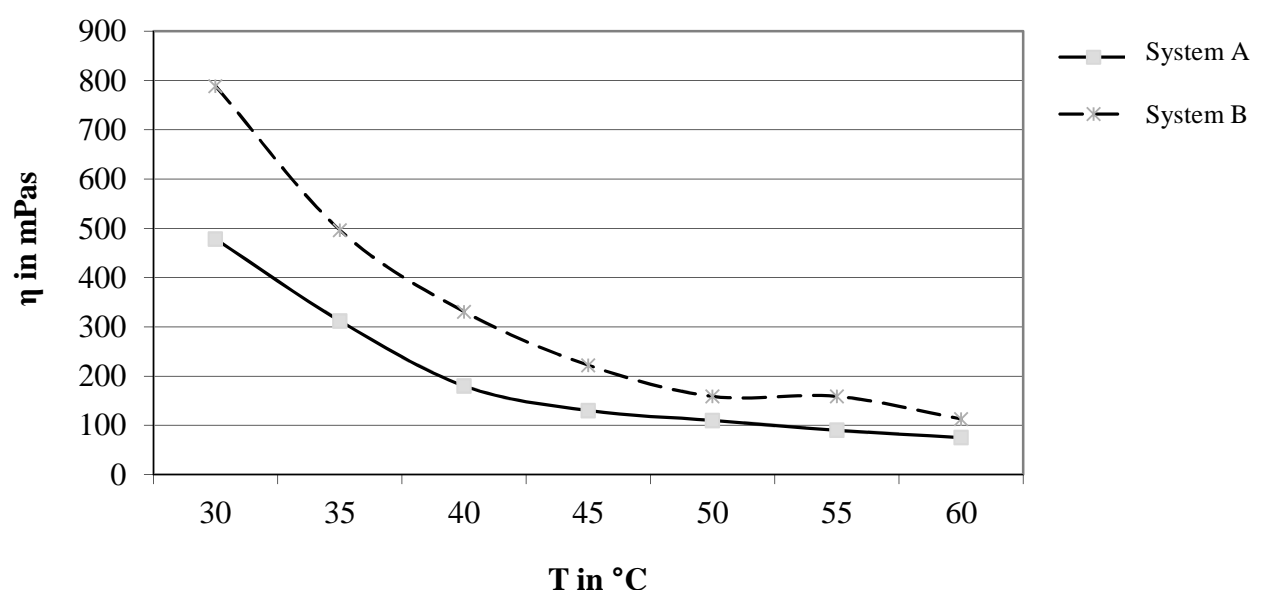


Abbildung 12: Gegenüberstellung der Matrixviskositäten [TMa 11]

Selektion des Composite-Systems

Folgende Versuche wurden unternommen, um das geeignete System für die Herstellung der Serienproduktion zu finden. Hierbei stand im Vordergrund, dass der definierte Laminataufbau problemlos und reproduzierbar erreicht werden konnte.

Tabelle 9: Untersuchte Rohstoffkombinationen

Order	34/600	C30 T050	System B	System A	φ
System	Grafil	SGL	Hersteller B	Hersteller A	[%]
VED037	x			x	<50
VEB056	x			x	54
VEB083	x			x	52
VEB075		x		x	50
VEB090		x	x		50
VEB097		x	x		50
VEB005		x		x	51
VEB058		x	x		<50
VEB064		x		x	k.A.

Die Schwierigkeit in diesem Fall ist, dass eine hohe Wandstärke von 50 mm vorliegt, welche an zwei Wickeltagen mit je hälftiger Teilung, oft zudem bei verschiedenen Maschinenbedienern, hergestellt werden muss. Bei dem Wickelversuch VED0037 kam es zu einem starken Aufschwimmen der Fasern. Der Verbund war sehr wellig und für den weiteren Gebrauch nicht verwendbar. Ein exaktes Bestimmen des Faservolumengehaltes war nicht möglich. Der Faservolumenanteil wurde deshalb mit unter 50 % definiert. Eine Bearbeitungszugabe von 2 mm zeigte sich in den Versuchen als ausreichend, um die Welligkeit an der gewickelten Struktur zu beherrschen. Die Tabelle 9 zeigt die Rohstoffkombinationen der verschiedenen Versuche auf.

Für den Untersuchungsgegenstand wurde die Grafil-Faser ausgewählt, resultierend aus der Versuchserkenntnis, dass die Imprägnierung und auch das Erreichen der Zielvorgaben reproduzierbarer erreicht werden konnten. Erschwerend zeigte der untersuchte SGL-Batch ein durch zu hohes Sizing verursachtes Verkleben der Rovingspulen. Es bleibt zu vermuten, dass dies der Umstellung des Precursor-Herstellers geschuldet ist [SGL 11], [Akt 12].

Die Entscheidung für das Anhydridsystem (System A) ist dadurch zu begründen, dass die Topfzeit sich für die Bedürfnisse des Zielprozesses ideal eignet, die eigentliche Reaktion aber erst im Temperofen einsetzt, und auch die umwelttechnischen Forderungen leichter zu erfüllen sind, als die des aminschen Systems.

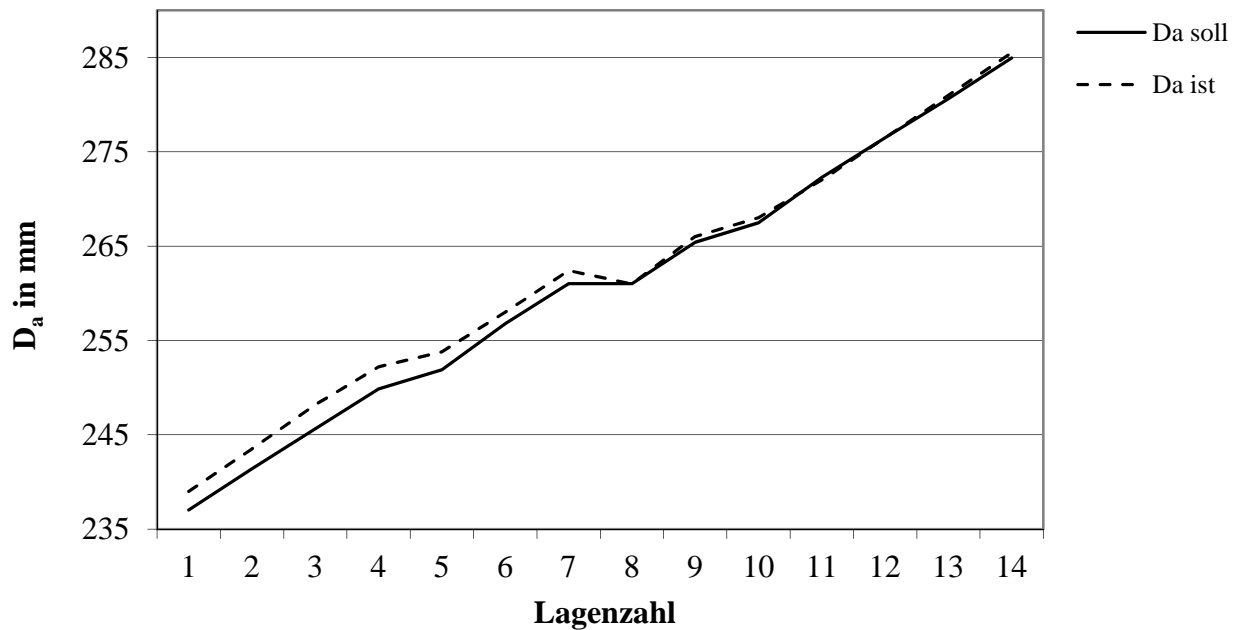


Abbildung 13: Laminataufbau Versuch VEB0090, 1. Wickeltag

Die Abbildung 13 zeigt den ersten Wickelaufbau des Demonstrators VEB0090. Es konnte gezeigt werden, dass reproduzierbar eine enge Vorgabe der Layerwandstärke und somit des Durchmesserbaus dauerhaft erreicht werden kann. Es muss aber angemerkt werden, dass der Operator der Maschine nur durch kontinuierliches Messen in Kombination mit der Anwendung der Komprimierschritte den Prozess steuerte. Hierfür wurden für den konventionellen Prozess folgende Prozessparameter, vgl. Tabelle 10, eingestellt.

Tabelle 10: Versuchsparameter des Batch VEB0090

Beschreibung	Wert	Einheit
Harzbadtemperatur	55	[°C]
Infrarotstrahler	30	[°C]
Fadenspannung Kreuzlagen	20	[N/Rov]
Fadenspannung Umfangslagen	25	[N/Rov]
Komprimierstufen	3	[/]

Temperzyklus für die verwendeten Epoxidharzsysteme

Epoxidharze (EP) werden durch Polyaddition von Epichlorhydrin und Bisphenol A, bei Spezialharzen können es andere Ausgangsstoffe sein, hergestellt. Die beiden Komponenten reagieren in Anwesenheit von NaOH (Natronlauge) in einem Zweistufenprozess, einer Addition mit anschließender Dehydrohalogenierung, zu einem linearen Polyether mit endständigen Epoxidgruppen [MJF 90]. Je nach beigefügter Menge der Härter, Verdünner und Lösungsmittel verändern sich ihre Eigenschaften. EP sind Reaktionsharze und sowohl kalt- als auch warmhärtend. Diese Systeme besitzen eine hohe Härte und auch Abriebfestigkeit. Die Schwindung ist bis zu 5 % kleiner als bei den ungesättigten Polyesterharzen. Die Härtedauer kann durch Zusätze oder entsprechend hohe Umgebungstemperaturen verkürzt werden. Als Laminierharz

kommt den Epoxiden eine große Bedeutung zu, besonders bei der Herstellung von Faserverbundwerkstoffen.

Bei der Herstellung von Composite-Bauteilen im Filament-Winding-Verfahren ist die Eigenschaft der Viskosität sehr entscheidend. Für die Kalthärtung flüssiger Epoxidharze werden vorwiegend flüssige aliphatische Polyamine und Polyamidoamine verwendet, tertiäre Amine dienen als katalytisch wirksame Beschleuniger des Härteprozesses [BBO 07]. Für die Warmhärtung, in der Regel größer 80 °C, kommen sowohl aromatische Amine oder deren Derivate als auch Anhydride der Phthalsäure zur Anwendung [BBO 07]. Sehr gute Beständigkeit gegen Chemikalien haben aliphatische, gegen Lösemittel aromatische Amine. Die beste Witterungs- und Säureresistenz weisen anhydritisch gehärtete Systeme auf. Die ersten Epoxidharze wurden 1946 von der Ciba AG in Basel industriell gefertigt. Die heute am meisten eingesetzten EP werden mittels Polyaddition aus Epichlorhydrin und Bisphenol A hergestellt. Beim Übergang vom flüssigen in den festen Zustand findet in Folge der chemischen Reaktion eine Volumenkontraktion statt. Dies führt zu induzierten Eigenspannungen im Faserverbundmaterial, vgl. hierzu Kapitel 4.4.

Epoxidharze werden auch oftmals oberhalb ihrer Glasübergangstemperatur gehärtet. Grund hierfür sind die langsamen Härtingsreaktionen des Werkstoffes. Demnach ergeben sich bei unterschiedlichen Tempertemperaturen unterschiedliche Aushärtegrade. Mit dem Aushärtegrad steigt somit auch die Glasübergangstemperatur an [Ehg 06]. Darüber hinaus ist zu beachten, dass das Wickelwerkzeug, welches in der Regel ein Vielfaches vom Laminatgewicht hat, den Temperprozess des Laminats im Ofen beeinflusst [Ris 04]. Bei der Herstellung von Filament-Winding-Produkten können vor allem Fehler, wie Porositäten, Fremdeinflüsse oder Temperfehler, auftreten [Mug 93]. Diese sind über akustische, radiologische, optische elektrische und thermografische Prüfverfahren nachweisbar.

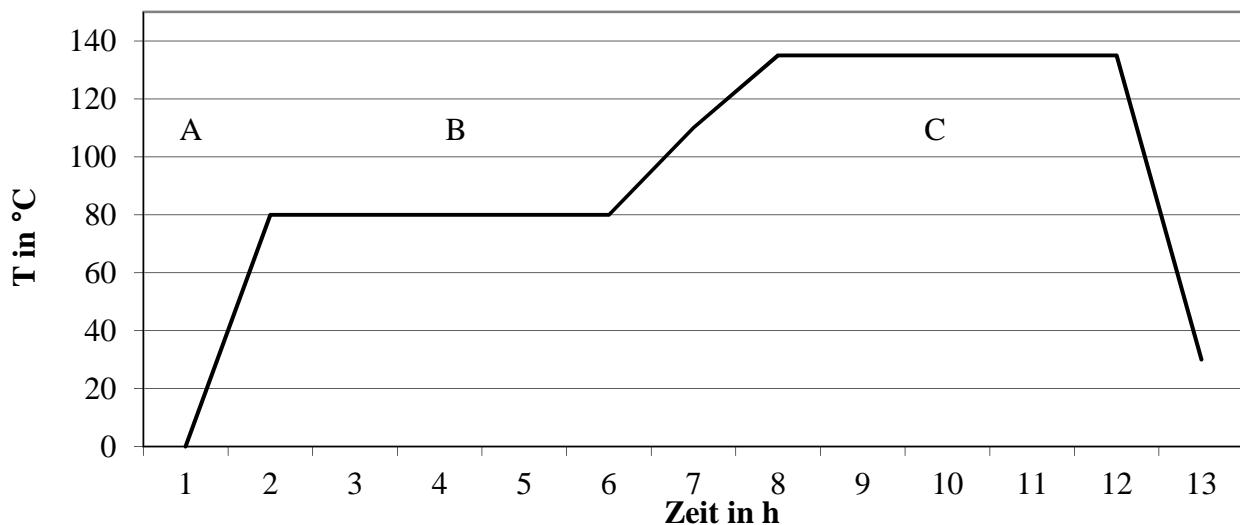


Abbildung 14: Gewählte Temperkurve für die Untersuchungstypen [Ris 04]

Als Heizkurve für das Verbundlaminat wurde in Rücksprache mit dem Rohstoffhersteller folgender Zyklus definiert, vgl. Abbildung 14: **A)** Das Bauteil wird innerhalb von 90 Minuten auf 80 °C gebracht. Diese Zone hat verschiedene Aufgaben. Zum einen wird der nasse Faserverbund inklusive des Wickelkerns auf die erste isotherme Härtezone gebracht, in der sich die Viskosität des Laminiersystems noch einmal erniedrigt und gezielt abtropft. Damit erhöht sich der Faservolumenanteil im Bauteil selbst. Zum anderen tritt gegen Ende der 80°C-Stufe die Verfestigung des Matrixsystems ein. **B)** Im Anschluss wird das Laminat innerhalb von zwei Stunden auf 135 °C angehoben. **C)** In dieser Phase bildet sich der notwendige TG aus. Hierbei

handelt es sich um einen vom Harzhersteller empfohlenen Zyklus, welcher sich auch als Standard in der Praxis wiederfindet, vgl. [Ris 04].

Bestimmung des Glasübergangspunkt vom untersuchten Bauteil

Mit der Hilfe der Kalorimetrie lassen sich aus Thermogrammen spezifische Wärmekapazitäten von Stoffen berechnen oder Veränderungen der Probe beschreiben, die beispielsweise während eines Glasübergangs stattfinden. Die thermischen Effekte, die bei Phasenübergängen von Stoffen, beispielsweise beim Schmelzen, Verdampfen oder Kristallisieren, entstehen, sind Grundlage für diese Messung. Der Glasübergangspunkt beschreibt eine Änderung des Moduls, begründet durch eine Erhöhung der Beweglichkeit der Molekülketten, auch ausgeprägt durch eine Erhöhung der Dämpfung [BBO 07]. Das benutzte Verfahren zur thermodynamischen Charakterisierung mittels der differentiellen Kalorimetrie beruht auf der sogenannten Wärmestromdifferenzmethode. Jede Phasenumwandlung eines Materials ist mit einer exothermen oder endothermen Reaktion verbunden. Diese kann mittels der sogenannten Dynamischen Differenzkalorimetrie, englisch Differential-Scanning-Calorimetry (DSC) genannt, gemessen werden.

Die Probe VEB064 wurde mit dem anhydritischen Matrixsystem hergestellt und mit dem modifizierten Temperzyklus gehärtet. Der Appendix AS in Abbildung 15 zeigt an, dass an der Ofenvorderseite und NAS, dass an der Rückseite gemessen wurde. Es wurde nachgewiesen, dass mit dem modifizierten Temperzyklus im Glasübergangspunkt 135 °C (T_G) erreicht werden. Der Prüfling wurde einem zweiten Lauf unterzogen, der bestätigte, dass das Material noch reaktiv und somit in der Lage ist, den Glasübergangspunkt noch zu erhöhen. Da die untersuchte Applikation aber nur mit 120 °C in der Herstellung belastet und im späteren Einsatz aber konsequent unter 80 °C betrieben wird, kann der modifizierte Temperzyklus für den weiteren Prozess akzeptiert werden. Vergleiche zusätzliche Informationen über den Glasübergangspunkt im Anhang unter Kapitel 9.

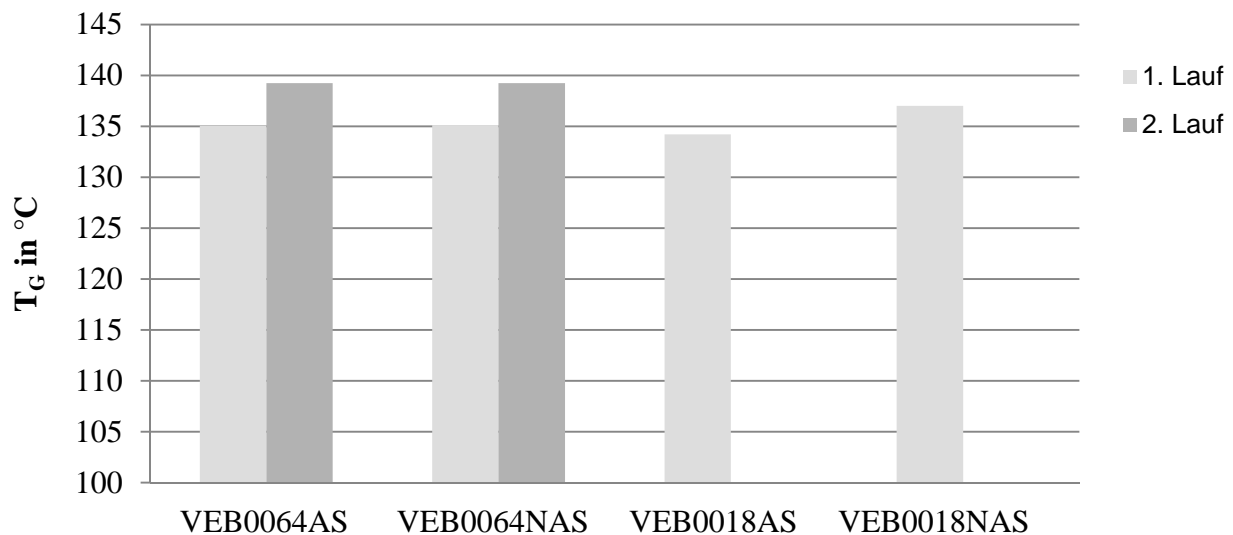


Abbildung 15: Gemessener Glasübergangspunkt der verschiedenen Prüflinge

Modifizierter Laminataufbau VEC0013 V2

Der Laminataufbau wurde unter Verwendung der Software „Laminat-Calculator“ erzeugt und in der Praxis verifiziert [MKe 08]. Berechnungsgrundlage ist die klassische Laminattheorie [AAR 96], [KRA 97], [Sch 07], welche den Laminataufbau rechnerisch in die notwendigen Ausgangsparameter überführt.

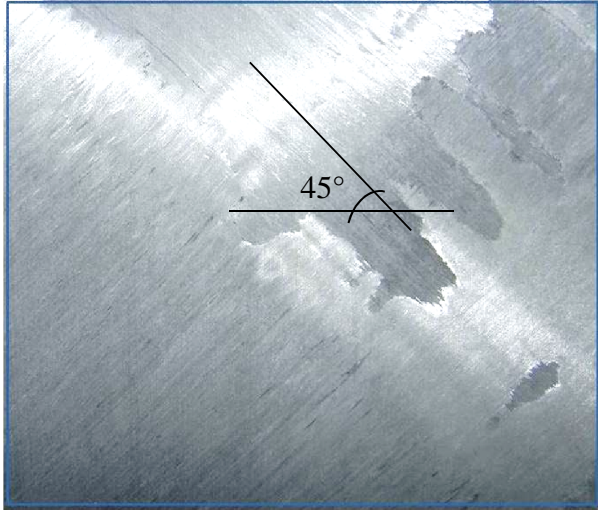


Abbildung 16: Erkennbare 45°-Schleiflage [TMa 11]

Die Lage 29 in Tabelle 21, Anhang Kapitel 9, besteht aus einer stark überlappten 45°-Wickellage. Die Funktion hierbei ist nicht ein Zugewinn an Steifigkeit, sondern eine reine Schleiflage, vgl. Abbildung 16. Diese Schleiflage hat die Aufgabe, sich möglichst sauber und vor allem geschlossen über die letzte 12°-Kreuzlage zu legen, welche sich naturgemäß aufgrund des geringen radialen Drucks nicht schließend in diesen Tapebreiten abbilden lässt. Der erzeugte Faservolumenanteil des Batches VEB0075 wurde mit 49,66% bei einer Verbunddicke von 1,49 g/cm³ bestimmt. Unter Berücksichtigung einer Faserdicke von 1,88 g/cm³ sowie einer Harzdicke von 1,22 g/cm³ ergab sich hieraus ein Fasergewichtsgehalt von 62,71%.

4.4 Hygrothermische Eigenspannungen

Die extreme Schichtanisotropie bei der betrachteten MSV-Zylinderschale verursacht infolge hygrothermischer Belastung eine starke Verformungsbehinderung der dünnen Lagen gegeneinander, was zu einem komplexen dreidimensionalen Spannungszustand im Schichtverbund führt. Vor allem durch fertigungsbedingte Wärmeeinwirkung und Mediendiffusion werden unstetige Eigenspannungen wirksam, die in der Regel unerwünschte Deformationen erzeugen und vereinzelt das Versagen der gesamten Verbundstruktur herbeiführen können. Für eine optimale Verbundauslegung derartiger FKV-Zylinderschalen müssen daher erweiterte Berechnungsmethoden zur Anwendung kommen, die sowohl die Anisotropie der Einzelschichten als auch die Heterogenität des Schichtverbundes erfassen. Für die untersuchte CFK-Walze mit hohen Steifigkeitssprüngen zwischen den Einzellagen erweist sich die MSV-Theorie für dickwandige Zylinderschalen als besonders vorteilhaft hinsichtlich der Berechnungsgenauigkeit, vgl. [SKU 09]. Bei Beanspruchung der FKV-Zylinderschale infolge rotationssymmetrischer Belastung sind die resultierenden Spannungen ausschließlich vom Radius r abhängig. Für die Schubspannungen (τ_{ij}) gelten für diesen Belastungszustand die Gleichgewichtsbedingungen:

$$\tau_{rz} = \tau_{r\varphi} = 0 \quad (1)$$

MSV-Zylinderrohre unter rotationssymmetrischer Belastung unterliegen in der Praxis im Wesentlichen Zug- oder Druckkräften in axialer Richtung, der Torsion, dem Innen- oder Außendruck, Fliehkräften und radialem Wärme- und Medientransport. Zur Berechnung von dickwandigen rohrförmigen Strukturen dient als mechanisches Ersatzmodell die Verbund-Zylinderschale, die aus mehreren Einzelschichten zusammengesetzt ist, vgl. Abbildung 17.

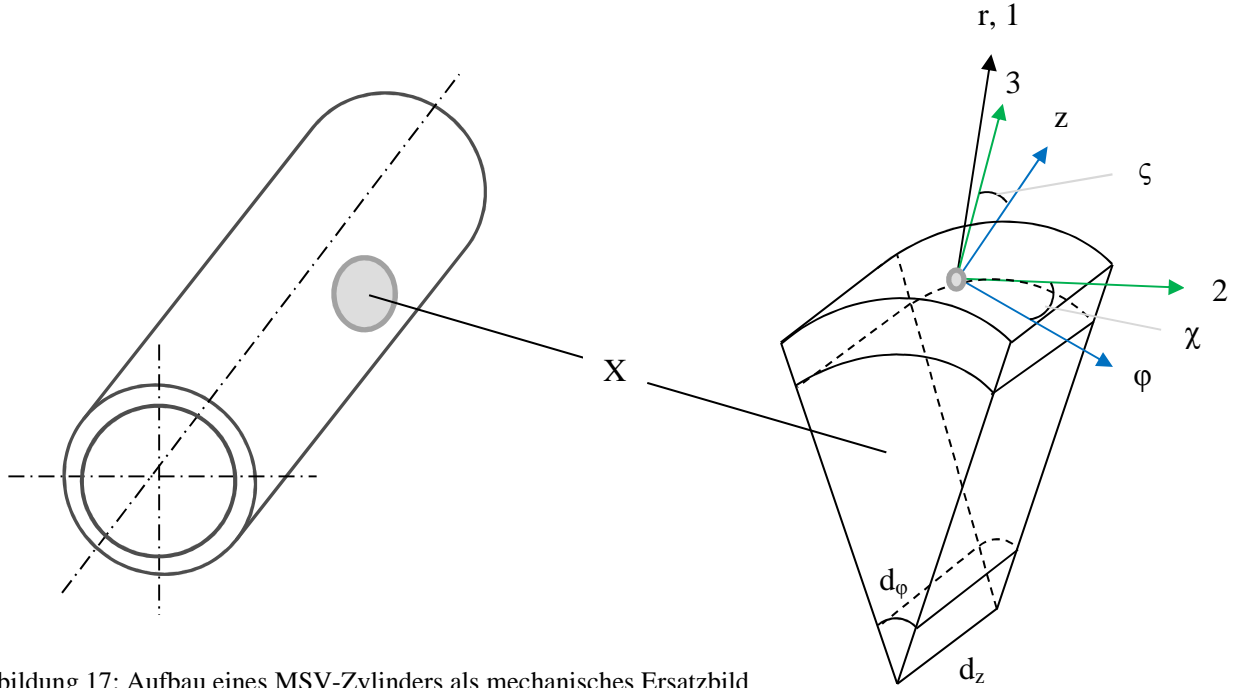


Abbildung 17: Aufbau eines MSV-Zylinders als mechanisches Ersatzbild

Das erweiterte Stoffgesetz des MSV für dickwandige Zylinderschalen ergibt sich durch Polartransformation der Werkstoffeigenschaften des faserangepassten lokalen Einzelschichtkoordinatensystems (1, 2, 3) in das globale Zylinderkoordinatensystem des Gesamtverbundes (r, φ, z), siehe etwa [Krl 92].

$$\begin{pmatrix} \sigma_r \\ \sigma_\varphi \\ \sigma_z \\ \tau_{\varphi z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \varepsilon_r - \alpha_r T_\Delta - \beta_r M_\Delta \\ \varepsilon_\varphi - \alpha_\varphi T_\Delta - \beta_\varphi M_\Delta \\ \varepsilon_z - \alpha_z T_\Delta - \beta_z M_\Delta \\ \kappa_{\varphi z} - \alpha_{\varphi z} T_\Delta - \beta_{\varphi z} M_\Delta \end{pmatrix} \quad (2)$$

Mit $C_{ij} = S^{-1}_{ij}$ ($i, j = 1, 2, 3, 4$) als den Steifigkeitskomponenten innerhalb der Schichtebene. Durch Multiplikation der Steifigkeits- mit der Verzerrungsmatrix lassen sich die Spannungs-Verzerrungs-Beziehungen in ausgeschriebener Form angeben.

$$\begin{aligned} \sigma_r &= C_{11}\varepsilon_r + C_{12}\varepsilon_\varphi + C_{13}\varepsilon_z + C_{14}\kappa_{\varphi z} - C_{\alpha r}T_\Delta - C_{\beta r}M_\Delta \\ \sigma_\varphi &= C_{12}\varepsilon_r + C_{22}\varepsilon_\varphi + C_{23}\varepsilon_z + C_{24}\kappa_{\varphi z} - C_{\alpha \varphi}T_\Delta - C_{\beta \varphi}M_\Delta \\ \sigma_z &= C_{13}\varepsilon_r + C_{23}\varepsilon_\varphi + C_{33}\varepsilon_z + C_{34}\kappa_{\varphi z} - C_{\alpha z}T_\Delta - C_{\beta z}M_\Delta \\ \tau_{\varphi z} &= C_{14}\varepsilon_r + C_{24}\varepsilon_\varphi + C_{34}\varepsilon_z + C_{44}\kappa_{\varphi z} - C_{\alpha \varphi z}T_\Delta - C_{\beta \varphi z}M_\Delta \end{aligned} \quad (3)$$

Dabei beschreiben die hygrothermischen Materialkonstanten den Einfluss der elastischen Werkstoffeigenschaften sowie der Wärmeausdehnungs- und Querkoeffizienten auf die thermischen- und medienbedingten Spannungen.

$$\begin{pmatrix} C_{\alpha r} \\ C_{\alpha \varphi} \\ C_{\alpha z} \\ C_{\alpha \varphi z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \alpha_r \\ \alpha_\varphi \\ \alpha_z \\ \alpha_{\varphi z} \end{pmatrix} \text{ und} \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} C_{\beta r} \\ C_{\beta \varphi} \\ C_{\beta z} \\ C_{\beta \varphi z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \beta_r \\ \beta_\varphi \\ \beta_z \\ \beta_{\varphi z} \end{pmatrix}$$

Die allgemeinen kinematischen Beziehungen der Schichtverzerrungen ergeben sich nach einer geometrischen Linearisierung zu:

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r}, \quad \varepsilon_\varphi = \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \varphi} + \frac{u}{r}, \quad \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}, \quad \gamma_{\varphi z} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \varphi} \quad (5)$$

Aus diesen Beziehungen, Gleichung (1) sowie den konstitutiven Gleichungen der anisotropen Verbundschicht beliebiger Faserorientierung lassen sich die Verschiebungen ableiten:

$$u = u(r), \quad v = K_d * r * z, \quad w = K_c * z \quad (6)$$

Dabei bestimmen die Konstanten K_c und K_d die Dehnungen in Axialrichtung bzw. Drillungen im Gesamtschichtverbund der Zylinderstruktur gemäß den Lastrandbedingungen. Aus Gleichung (6) folgt für die Verzerrungen bei rotationssymmetrischer Belastung:

$$\varepsilon_r = u'(r), \quad \varepsilon_\varphi = \frac{1}{r} u(r), \quad \varepsilon_z = K_c, \quad \gamma_{\varphi z} = K_d r, \quad \gamma_{r\varphi} = \gamma_{rz} = 0 \quad (7)$$

Unter Berücksichtigung der Gleichgewichtsbedingungen am infinitesimalen Volumenelement folgt in Zylinderkoordinaten:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\varphi}{r} + F_r = 0 \quad (8)$$

mit F_r als Volumenkraft in radialer Richtung der Zylinderschale.

Wird das erweiterte Stoffgesetz (3) für die Normalspannungen σ_r und σ_φ zusammen mit den Verschiebungsansätzen aus (6) in die Gleichgewichtsbedingung (8) eingesetzt, so ergibt sich die beschreibende Differenzialgleichung für die Radialverschiebung $u(r)$ der anisotropen Einzelschicht:

$$\begin{aligned} C_{11} r^2 \frac{d^2 u}{dr^2} + C_{11} r \frac{du}{dr} - C_{22} u &= -(C_{13} - C_{23}) K_c r - (2C_{14} - C_{24}) K_d r^2 - F_r r^2 \\ + C_{\alpha r} r^2 \frac{dT}{dr} + (C_{\alpha r} - C_{\alpha \varphi}) r T_\Delta + C_{\beta r} r^2 \frac{dM}{dr} + (C_{\beta r} - C_{\beta \varphi}) r M_\Delta &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

Dabei gilt $C_{11} \neq C_{22}$ bei anisotropen und $C_{11} = C_{22}$ bei isotropen oder transversal-isotropen Werkstoffeigenschaften der Einzelschicht in der (r, φ) -Ebene. Mithilfe der Radialverschiebung $u(r)$ lassen sich somit die räumlichen Spannungs- und Verzerrungszustände der dickwandigen anisotropen Zylinderverbundschale ermitteln, wobei eine vollkommene Haftung der Einzellagen vorausgesetzt wird.

4.5 Berechnung der Laminatstruktur

Durch Anwendung der erweiterten MSV-Theorie sind die Spannungs-, Verzerrungs- und Verformungszustände der CFK-Walze, vgl. Kapitel 4.2, mit dem Lagenaufbau gemäß Anhang 0 unter thermischer und medialer Belastung berechnet worden. Im Vordergrund stand die Fragestellung, inwieweit die nach der Abkühlung ($T_{\Delta} = -120^{\circ}\text{C}$) induzierten Wärmeeigenstressungen durch die Quelleigenstressungen infolge typischer Feuchtaufnahme ($M_{\Delta} = 1\%$) abgemindert werden. Die Ergebnisse der Spannungs- und Verformungsberechnung für den Lastfall „Temperaturabfall“ ist in der Abbildung 18 und Abbildung 20 in Abhängigkeit vom Radius r dargestellt. Das entsprechende Diagramm für die Verzerrungen ist im Anhang unter Abbildung 85 und Abbildung 86 angegeben.

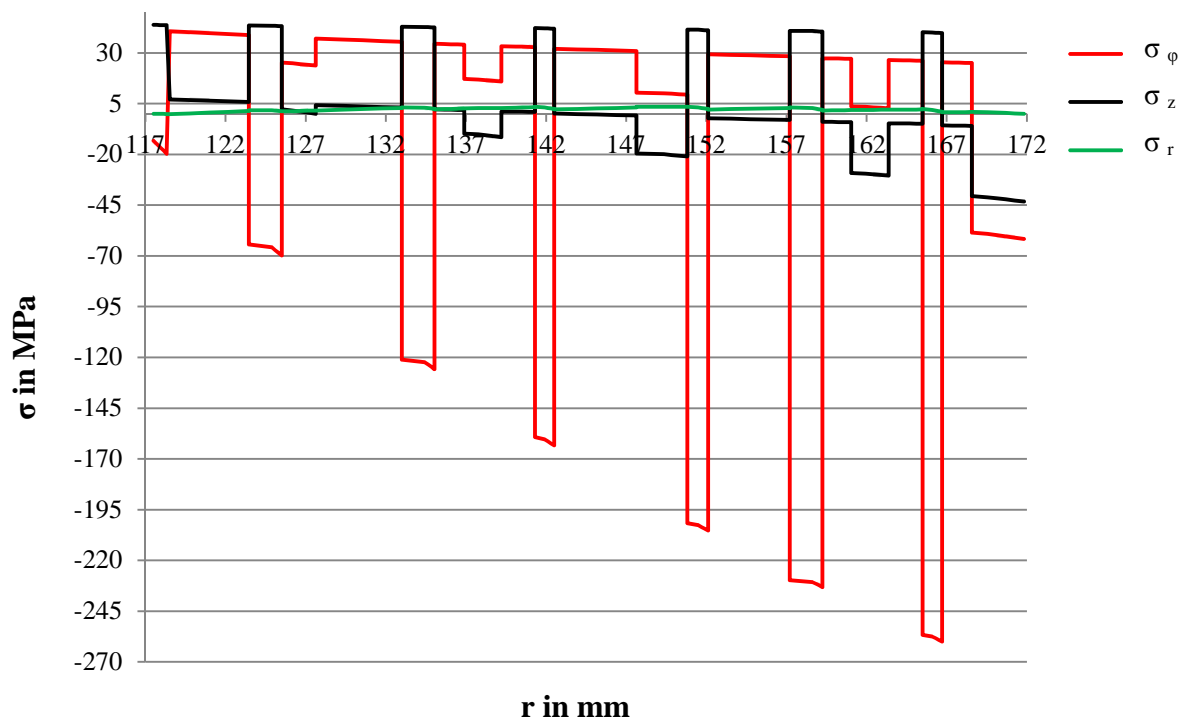


Abbildung 18: Normalspannungen nach Temperaturbelastung

Aus Abbildung 18 geht hervor, dass nach der Herstellung der CFK-Walze durch Abkühlung auf Raumtemperatur sehr hohe Eigenspannungen auftreten, die beispielsweise in den $\pm 12^{\circ}$ - und $\pm 30^{\circ}$ -Schichten versagenskritische Werte von etwa 32 MPa annehmen. Die thermischen Eigenspannungen haben eine Verformung von 0,35 mm zur Folge, vgl. Abbildung 20, die bei der konstruktiven Ausführung der metallischen Lasteinleitungen besonders zu berücksichtigen ist. Nach der Herstellung nimmt die CFK-Walze durch Diffusionsvorgänge sukzessive Feuchtigkeit auf, wobei für typische CFK-Lamine bei Normalklimabedingungen oft von einer üblichen Feuchtigkeitsaufnahme $M_{\Delta} \approx 1\%$ ausgegangen wird. Die einhergehende absorptionsbedingte

Quelldehnung führt in der Regel zur Reduktion der schrumpfbedingten Eigenspannungen infolge Abkühlung.

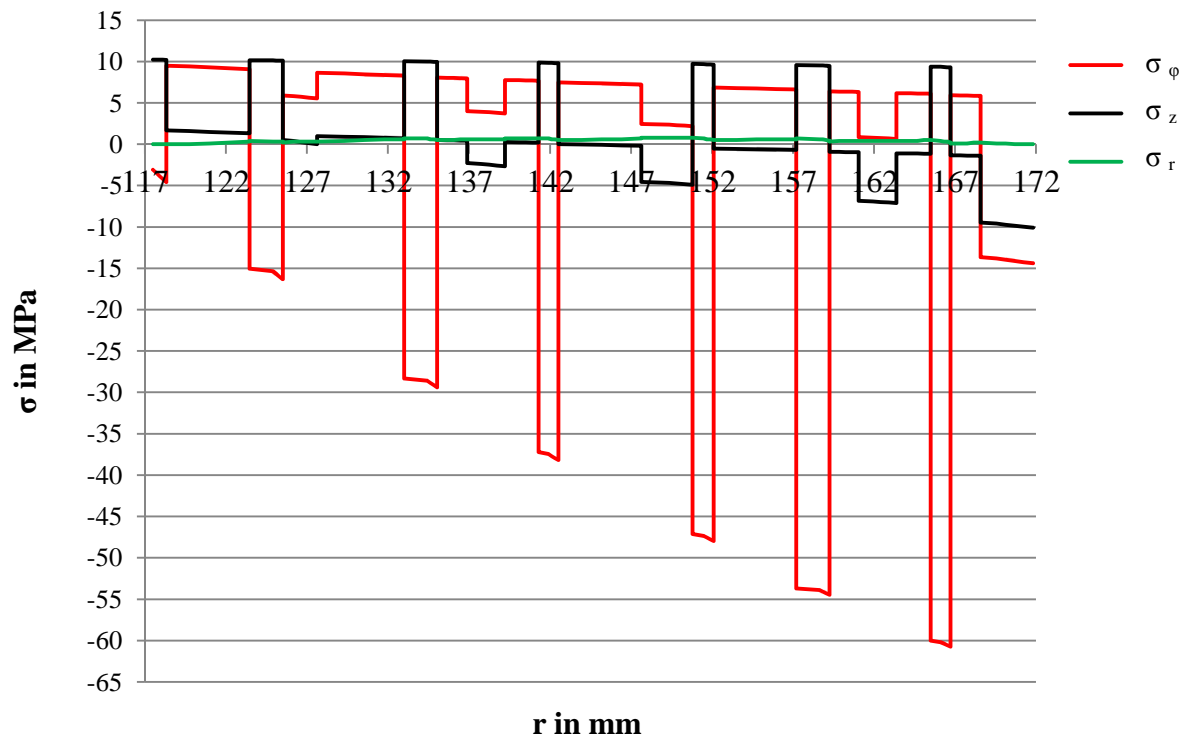


Abbildung 19: Normalspannungen nach Temperaturbelastung und Konditionierung ($M_\Delta = 1\%$) an der Stelle $l=500$

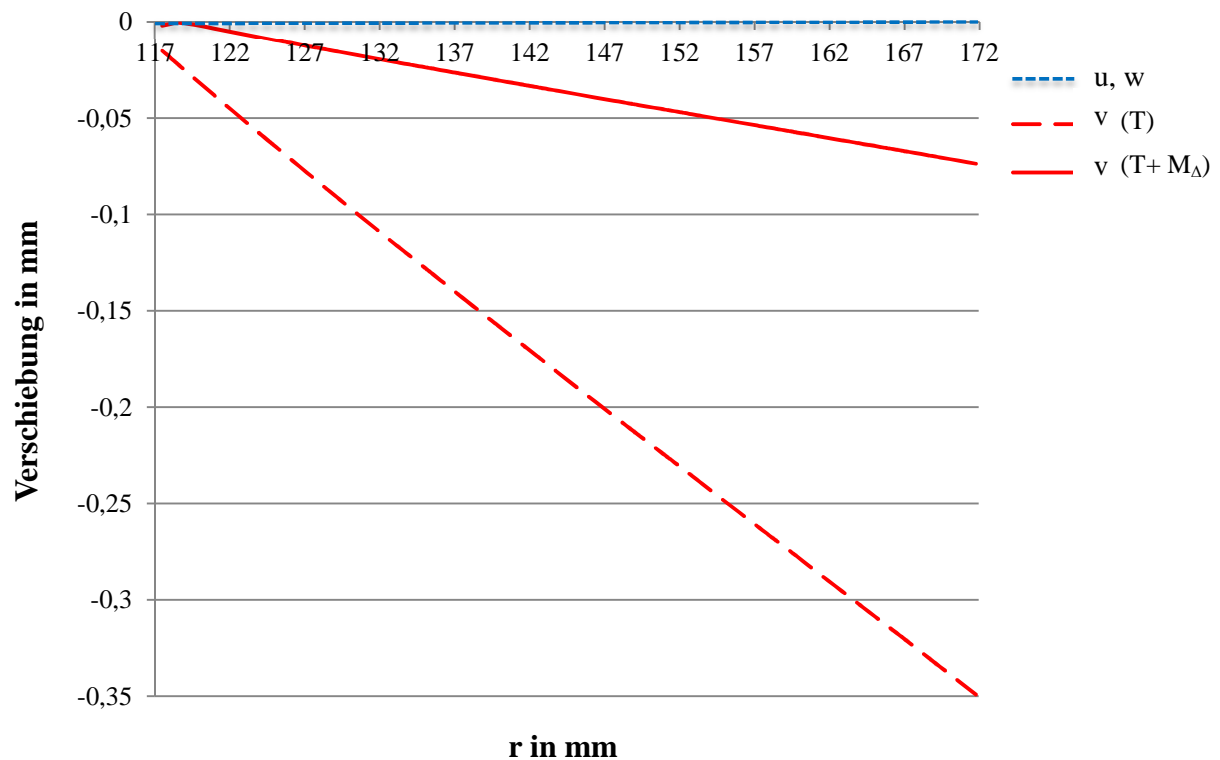


Abbildung 20: Verschiebung v nach Temperaturbelastung $T_\Delta=120^\circ\text{C}$ mit und ohne Konditionierung ($M_\Delta = 1\%$) an der Stelle $l=500$

Aus dem Spannungsverlauf, vgl. Abbildung 19, geht hervor, dass bei der CFK-Walze eine Abnahme der thermischen Eigenspannungen bei der Überlagerung mit den feuchtebedingten Spannungen festzustellen ist. Abbildung 19 und Abbildung 20 zeigen die resultierenden Spannungen und Verformungen für den überlagerten Belastungsfall „Temperatur“ und „Feuchte“. Ebenfalls wird die max. radiale Verschiebung von -0,35 auf -0,075 mm drastisch reduziert. In der Abbildung 20 wird der Graph für die Verschiebung nach Temperaturbelastung mit und ohne Konditionierung aufgezeigt. Die Verschiebungen in z- und r-Richtung sind aufgrund der geringen Steifigkeit in Dickenrichtung und der Betrachtung eines Ringsegments über die Länge der CFK-Walze an der Stelle $z = 500\text{ mm}$ im Wert null. Daraus folgt, dass bei derartigen Bauteilen vor der Inbetriebnahme eine definierte Auslagerung beim Raumklima erfolgen muss.

4.6 Wettbewerbsvorteil und Routine

Der Wettbewerbsvorteil ist die Grundlage jeder Strategie. Es sind die Wettbewerber, die die Ertragskraft maßgeblich bestimmen. Realer Erfolg benötigt deshalb den dauerhaften Wettbewerbsvorteil als Ausgangsbasis. Für den Begriff Wettbewerbsvorteil existiert eine Summe von Interpretationen, jedoch im Inhalt ist eine im Vergleich zum Wettbewerb überlegene Leistung als Kern zu sehen. Nach GRONAU [Grn 09] sind hierbei drei Merkmale entscheidend:

- muss für den Kunden wichtig sein
- muss vom Kunden als solcher wahrgenommen werden
- darf von der Konkurrenz nicht schnell eingeholt werden.

Aus der Sicht des Kunden muss eine Differenzierung zum Wettbewerb vorliegen. Einfaches Kopieren eines bereits im Markt vorhandenen Produktes geht in der Regel mit Qualitätseinbußen einher und führt zwangsläufig zu Preiskämpfen [Koh 05]. Es geht darum, den Wert des Produktes zu erhöhen. So kann zum Beispiel eine hochwertige, vielleicht über Patente geschützte Produktoberfläche die Standzeit erhöhen und somit den Wert steigern. Das Ziel der Differenzierungsstrategie ist es, die Produkte so zu gestalten, dass sie in den Augen der Käufer als einzigartig angesehen wird. Bei der Kaufentscheidung muss das Preisargument durch diese Einzigartigkeit in den Hintergrund gedrängt werden. Eine erfolgreiche Differenzierungsstrategie bewirkt eine höhere Kundenloyalität und eine geringere Preissensibilität der Kunden. In vielen reifen Märkten wurde in den vergangenen Jahren beobachtet, dass Anbieter ohne nachhaltigen Wettbewerbsvorteil Wachstumsstrategien verfolgten. Dies führt lediglich zu Umgruppierungen zwischen im Wesentlichen austauschbaren Wettbewerbern und hat eine typische Folge: Am Ende ist die Marktanteilsverteilung zwischen den Anbietern dieselbe wie zuvor, nur das Preisniveau ist deutlich niedriger, vgl. [Koh 05].

Die umfassende Kostenführerschaft beruht auf den Erkenntnissen der Kostenerfahrungskurve. Mit jeder Verdoppelung der im Zeitablauf kumulierten Produktionsmengen gehen die auf die Wertschöpfung bezogenen Stückkosten eines Produktes potenziell um 20 bis 30% zurück [Oeb 03]. Dies setzt jedoch eine aggressive Kapazitätserweiterung voraus. Basis ist eine saubere Kostenanalyse, bezogen auf eine kostenorientierte Definition der Wertschöpfungskette, d.h. der Definition der Kostenstruktur jeder einzelnen Wertaktivität, zum Beispiel Beschaffung, Entwicklung, Vertrieb, etc. Die Kapazität ist mit den absetzbaren Einheiten genau abzugleichen. Die Strategie zur Konzentration auf Schwerpunkte zielt speziell auf Marktnischen ab [Pom 99]. Die Annahme ist, dass sie in dieser Nische entweder Differenzierung und/oder Kostenführerschaft eher erreichen können, als die branchenweit operierenden Konkurrenten. Tabelle 11 zeigt die technologischen Möglichkeiten hinter der beschriebenen Strategie auf. Es muss an dieser Stelle

auch das Risiko bei der kontinuierlichen Kostensenkung genannt werden. Dies birgt oft die Gefahr der Mitarbeiterunzufriedenheit und Demotivation.

Mithilfe metrischer Messmethoden, beispielsweise Arbeitsstunden oder Stückkosten, lassen sich in der Produktion Verbesserungen durch steigende Erfahrung aufzeigen. Die US Air Force untersuchte bereits im Jahr 1925 die Abnahme der Produktionsstunden zur Erhöhung der Produktionsmengen beim Bau von gleichartigen Flugzeugen, vgl. Abbildung 109. Lernkurven zeigen den Zusammenhang zwischen Leistung und Erfahrung. Das basiert auf der Tatsache, dass der Mensch mit zunehmender Ausführung einer Tätigkeit (Routine) diese immer besser beherrscht sowie lernt, Fehler zu vermeiden. Dieser Effekt hat eine Reduzierung der Fertigungszeit zur Folge. In Folge der reduzierten Fertigungszeit sinken auch in logischer Konsequenz die direkten Fertigungskosten. Die Boston Consulting Group führte zudem den Begriff der Erfahrungskurve ein, vgl. Information im Anhang Kapitel 9. Laut deren Definition [Oeb 03] wird hierbei das Verhalten der Selbstkosten zur Produktionsmenge definiert. Die Erfahrungskurve beinhaltet somit alle auf die Wertschöpfung bezogenen Kosten eines Produktes (jedoch nicht die Vor- und Fremdleistungen). Diese basiert auf der Entwicklung des Produktpreises am Markt. Die Senkung des Preises erfordert natürlich eine Verringerung der Kosten, womit die Verhältnismäßigkeit beider Größen einhergeht.

Tabelle 11: Definition Strategischer Vorteil [GRN 09]

Strategie Technologie	Produkttechnologie	Produktionstechnologie
Kostenführerschaft	Reduktion der Herstellkosten: - Materialkosten - Fertigungstechnik	Zum Erreichen von: - Lernkurven - Erreichen von „Economies of Scale“
Differenzierung	Durch Erhöhung von: - Produktqualität - Produktmerkmalen - Lieferfähigkeit - Vertrieb	Zum Erreichen von: - Höheren Toleranzen - Stärkere Qualitätskontrollen - Verlässliche Produktionsplanung - Mengeneffekte
Konzentration auf Schwerpunkte	Zum Erreichen von Alleinstellungsmerkmalen	Zur Anpassung der Wertschöpfungskette

Die Erfahrungskurve zeigt zunächst eine sehr stark fallende Funktion, das bedeutet sehr große Erfahrungsraten und damit verbundene Kostenabnahme. In Funktion der Zeit flacht jedoch die Kurve ab und zeigt somit deutlich die immer größer werdenden Anstrengungen auf, die unternommen werden müssen, um eine Kostendegression zu erreichen. Es ist daher verständlich, dass „junge Technologien“ schneller lernen als ältere, die absolut eine höhere zusätzliche kumulierte Produktionsmenge benötigen, als ein Produkt, das ganz am Anfang seiner Entwicklung steht. Wobei sich der Begriff von „junge Technologie“ ausschließlich auf die bereits hergestellte Menge eines Produkts bezieht, nicht aber auf die Zeit, seit der es produziert wird. Dies bedeutet in der Konsequenz, dass die jährliche Produktionsmenge immer weiter anwachsen muss, um die Wirksamkeit zu erhalten. Nach HALL und HOWELL [HHs 85] sei noch angemerkt, dass Kostensenkungen, die nach der Erfahrungskurve möglich sind, sich keineswegs autark einstellen, sondern selbst erwirtschaftet werden müssen. Die Erfahrungskurve als solche stellt nur ein durchschnittliches Kostensenkungspotenzial dar, welches nutzbar ist. Sie bezweifeln [HHs 85] darüber hinaus die endlose Linearität von Kostenkurven, das heißt, die ewig gleich bleibenden

Erfahrungsraten. In eigenen Untersuchungen an ähnlichen Produkten stellten sie fest, dass sich die unterschiedlichen Erfahrungskurven einer Asymptote annäherten.

Die Beherrschung der verwendeten Technologie ist ein Schlüssel zur Reduktion der Herstellkosten. Abbildung 21 zeigt qualitativ die Kosteneinsparung in Funktion zur Technologiebeherrschung [Bat 03]. Die Kurven A bis C unterscheiden sich in der Komplexität der Produkte. Ein einfaches Spritzgießteil würde sich in der Kurve A wiederfinden, ein multimaterieller Hydraulikschlauch beispielsweise in der Kurve C. Nicht sehr anspruchsvolle Technologien werden somit A zugeordnet. Die Lerneffekte sind hier auch nicht von der gefertigten Stückzahl abhängig. Hierzu würde zum Beispiel ein einfaches Wickelrohr zählen, die Kosten wären auch bei hoher Stückzahl und Beherrschung nur gering beeinflussbar. Die Erfahrungskurve B beschreibt technisch anspruchsvollere Produkte. Für die Anwendung sind wirtschaftliche Erfahrung als auch technologisches Wissen notwendig. Dies ist nur über die Produktionsmenge zu realisieren. In dieser Funktion sind folglich die Kosten von der gefertigten Stückzahl abhängig. Die höchsten Potenziale bietet die Erfahrungskurve C. Der Wissensaufbau, somit die Alleinstellungsmerkmale, ist die Grundlage für die hohe Ausbeute. Die Kurve spiegelt die Gruppe der „High-End-Technologien“ wieder. In der Regel sind diese schwer automatisierbar. In diesem Bereich ist der Untersuchungsgegenstand (RE) einzugliedern.

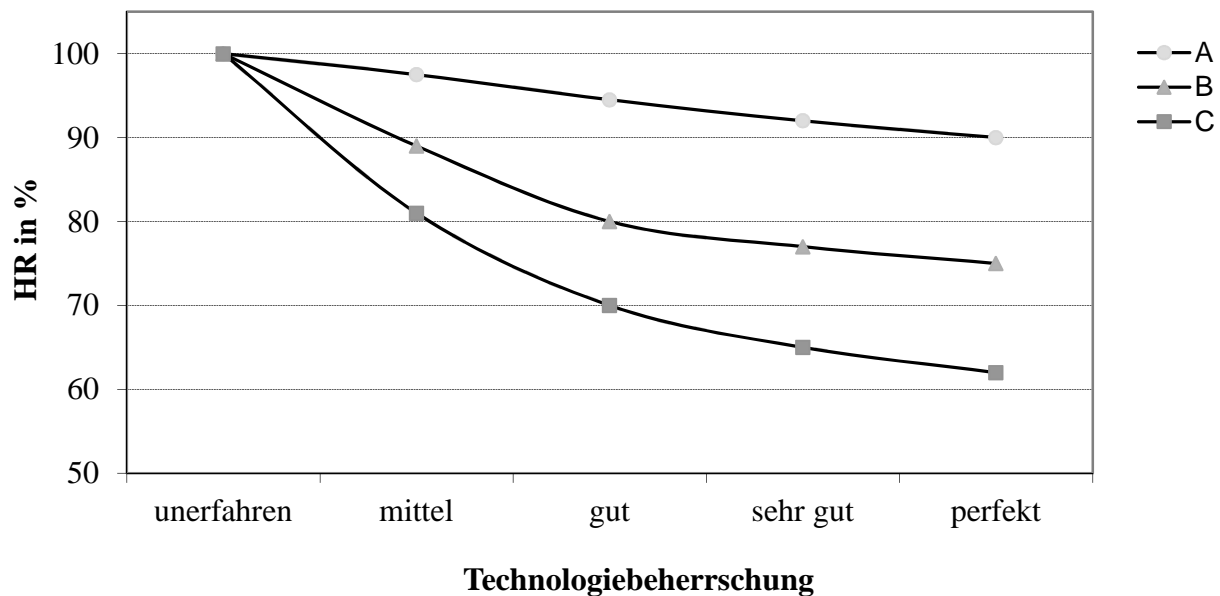


Abbildung 21: Erfahrungskurve in Technologiebeherrschung [Bat 03]

Der Begriff „Economies of Scales“ beschreibt die sinkenden Herstellkosten je Produktionseinheit im Zusammenhang mit steigender Ausbringungsmenge. Kostenverminderung (sogenannte Degression) ist die Folge der Aufteilung der Fixkosten auf einen wachsenden Ausstoß, sodass die Durchschnittskosten fallen. Hauptgrund hierfür ist die sogenannte Fixkostendegression. Darunter versteht man in der Kostentheorie, dass die gesamten fixen Kosten bei steigender Ausbringung auf eine größere Menge von Kostenträgern verteilt werden und infolgedessen die Stückkosten degressiv in den Kosten verlaufen. Somit entstehen Massenproduktionsvorteile, die in Form von Kostenersparnissen bei wachsender Ausbringungsmenge auftreten. Begründet sind diese Vorteile durch produktivitätssteigernde Spezialisierung, durch Lernprozesse (Erfahrungswert) oder durch Kapazitätsgrößenvorteile. Steigende Skalenerträge sind vor allem dann zu verwirklichen, wenn die Produktion an einem Standort konzentriert wird oder eine Spezialisierung auf verschiedene

Produkte an verschiedenen Standorten erfolgt. Steigende Skaleneffekte sind oft die Wirkung von der Konzentration auf Schwerpunkte.

Produktlebenszyklus

Das Modell des Produktlebenszyklus wurde von der BOSTON CONSULTING GROUP entwickelt [Oeb 03]. Es unterstellt, dass jedes Produkt von der Markteinführung bis zur Einstellung einen Lebenszyklus durchläuft. Dieser besteht aus vier Phasen. In der ersten Phase der Entwicklung und Einführung ist das Produkt noch eine Neuheit. Viele Produkte weisen in der Einführungsphase noch ein relativ hohes Preisniveau auf. Dies ist erforderlich, da die Produzenten noch keine Erfahrungskurven- und Skaleneffekte aus einer Serie nutzen können. Nach dem Boston-Consulting-Group-Portfolio, auch BCG-Matrix genannt, ist dies der Bereich der „Question Marks“. Es darf davon ausgegangen werden, dass der Untersuchungsgegenstand das Ende der Reifephase erreicht hat und in die Sättigungsphase eintritt. Vergleiche hierzu auch im Anhang die Abbildung 84, Kapitel 9, zur weiterführenden Information.

4.7 Das schlanke Produktionskonzept „Lean“

Lean Production als Vorbild für produzierende Unternehmen hat bereits eine lange Tradition. Schon TAYLOR [HeW 99] erkannte die Verschwendung als grundsätzliches Problem der Wertschöpfung. Er stellte fest, dass weniger die offensichtliche Vergeudung materieller Ressourcen, als vielmehr die größere tagtägliche Vergeudung menschlicher Arbeitskraft durch unangebrachte Maßnahmen den Leanen Prozess behindern. Lean Management wird dann angewandt, wenn es darum geht, die Produktivität der Fertigung zu optimieren, um auf diese Weise dem Kostendruck zu begegnen. Das gilt nicht nur für die Automobilindustrie, in der diese Methoden und Ansätze entstanden sind, sondern mittlerweile auch für viele andere Branchen. Kundenspezifische Produkte in hoher Qualität mit kurzen Lieferzeiten und zu akzeptablen Preisen anzubieten, ist die Herausforderung, die der Markt heutzutage an die Wettbewerbsfähigkeit von produzierenden Einheiten stellt. Zentraler Ansatz dabei ist die Wertstromausrichtung des gesamten Produktionsweges [Erk 10]. Alle Prozesse, die für die Herstellung notwendig sind, werden auf den Wertstrom abgestimmt. In der Folge steht die Erhöhung der Wirtschaftlichkeit des produzierenden Systems. Selbst die Überproduktion zählt im Lean Management zur Verschwendung und ist zu vermeiden, mit dem Ziel, Bestände zu senken, da diese Kapital und Platz binden. Daher ist es optimal, sofern die Randbedingungen es zulassen, die Produktionsrate für die Fertigung auf der Basis der Verkaufsrate festzulegen. Mangelnde Auslastung als auch Engpässe sind durch Anpassung der vorhandenen Anlagenkapazitäten möglichst zu vermeiden. Der optimale Zustand ist es, unter Verwendung der verschiedensten Maßnahmen, die Produktivität zu steigern, die Durchlaufzeiten und Bestände sowie den notwendigen Ressourceneinsatz zu senken. Nach dem Ersten Weltkrieg überführten HENRY FORD und ALFRED SLOAN die handwerklich geprägte Herstellungsart in die Massenfertigung. Nach dem Zweiten Weltkrieg modifizierten EIJI TOYODA und TAICHI OHNO das System zum schlanken Produktionssystem. Die Massenproduktion setzt Spezialisten ein, um Produkte zu konstruieren, welche von ungelernten Kräften montiert werden können. Da die Maschinen der Massenproduktion dominant sind und keine Störungen umsetzen können, sind folglich im Prozess viele Puffer und Reserven vorgesehen. Die Massenproduzenten lassen ihre Produktionsbänder nur in absoluten Notfällen anhalten, Produkte mit Fehler werden bewusst akzeptiert. Dieses System war nach Auffassung der japanischen Ingenieure voller Verschwendung, genannt „Muda“.

Im Unterschied hierzu kombiniert das „schlanke System“ die Vorteile an handwerklicher Produktion und der Massenfertigung. Dieses System kann somit als Optimierung gesehen werden. In der schlanken Produktion ist es erlaubt, das Band anzuhalten. Der Begriff „Lean Production“

wurde von KRAFCIK, einem Forscher am IMVP, geprägt [HL 99]. Die Motivation zu dieser Begriffsfindung kam aus dem Wort „schlank“, was als Synonym für „von allem wenig“ gilt. In Konsequenz entstand hieraus die „ungepufferte Produktion“. Massenproduktion funktioniert nach dem Motto „gut genug“, akzeptiert somit Fehler im System wie auch einen hohen Lagerbestand. Schlanke Unternehmen hingegen richten ihren Fokus auf Perfektion, kontinuierlich sinkende Kosten, Null-Fehler, keine Lagerbestände und hohe Produktvielfalt aus. WOMACK war der Auffassung, dass die Autoindustrie in Nordamerika Techniken anwendete, die sich seit FORDs Massenproduktionssystem wenig geändert hatten. Neue Denkschemen verlangten neue angepasste Prozesse. WOMACK, ROSS und JONES glaubten, dass die fundamentalen Ansätze der schlanken Produktion universell sind [WTR 94].

International Motor Vehicle Program (IMVP)

Das vom Bostoner Massachusetts Institute of Technology initiierte Forschungsprogramm IMVP über die Zukunft des Automobils untersuchte zwischen 1985 bis 1989 über 90 Montagewerke in 17 Ländern, mit der Zielsetzung, die Herausforderungen der globalen Automobilindustrie transparent zu machen. In diesem Zusammenhang fand der Begriff der Lean Production mit der Veröffentlichung des Ergebnisberichts durch WOMACK, JONES und ROOS im Jahr 1990 erstmals Einzug in den Sprachgebrauch. In der japanischen Bezeichnung wird der Begriff „Toyota Production System“ benutzt [GKA 07]. Die Studie zeigte deutlich auf, dass in der Automobilindustrie zwischen europäischen und amerikanischen Produzenten zum einen und japanischen Herstellern zum anderen nicht nur gravierende Unterschiede vorhanden sind, sondern dass eine Überlegenheit der japanischen Fertigungstechnologie im Hinblick auf Produktivität und Qualität festgestellt werden muss. Im Untersuchungszeitraum benötigten japanische Hersteller im Durchschnitt die Hälfte an Zeit und Geld, als die Amerikaner und Europäer. Dies gilt für die Entwicklung, Produktion sowie den Verkauf (in Bezug auf ein definiertes Standard-Auto). Initiatoren für das TPS sind TOYODA und OHNO. Das Toyota-Produktionssystem versetzt Mitarbeiter in die Lage, die Qualität durch ständige Verbesserung von Prozessen und Vermeidung der Verschwendung von natürlichen, menschlichen und unternehmerischen Ressourcen zu optimieren. Das TPS wirkt sich auf jeden Aspekt der Organisation aus und beinhaltet eine gemeinsame Basis an Werten, Wissen und Verfahren. Die Mitarbeiter werden mit gut definierten Verantwortlichkeiten in jedem Produktionsschritt betraut und jedes Teammitglied wird ermutigt, nach Verbesserungen zu streben. Das Resultat der Untersuchung war weder eine angewandte spezielle Methode oder Technik, wie Just-in-time, auch nicht der Arbeitseifer oder die geringeren Lohnkosten, sondern vielmehr die angewandte Philosophie selbst [Oht 93]. Die Vorteile generierten sich aus der Umsetzung der Denk-, Vorgehens- und Handlungsweisen, die das Verhalten der Mitarbeiter prägten [Oht 93]. Als weitere Konsequenz der Maßnahmen schien es Toyota notwendig, den Platzbedarf an Fabrikfläche auf ein Minimum zu reduzieren. Der Blickkontakt zwischen den Arbeitern sollte ermöglicht und Platz für Bestände eliminiert werden. Der Teilebestand für die laufende Produktion reduzierte sich somit auf bis zu eine Stunde. Da die Zulieferer von erheblicher Bedeutung sind, wurden diese in zwei Stufen eingeteilt. Zulieferer der ersten Stufe bedienen direkt den Endhersteller selbst. Zulieferer der zweiten Stufe bedienen in logischer Konsequenz den ersten. Um an der Wertschöpfung teilzuhaben, hält zum Beispiel Toyota Anteile an diversen Zulieferern der ersten Stufe. Bei Engineering-Prozessen werden die Zulieferer so früh als möglich mit eingeschaltet. Hierbei sind im Vergleich zu den europäischen und amerikanischen Grundsätzen Unterschiede zu erkennen, die sich ausdrücken in:

- wichtiger als der Preis sind Qualität und Zuverlässigkeit
- Beziehungen sollen langfristig und partnerschaftlich sein
- der Preis muss im Sinne der Ratio in Funktion der Zeit sinken.

Die Ergebnisse zeigten weiterhin, dass sich LP nicht nur auf den produzierenden Bereich beschränkt, sondern auch Funktionen wie Beschaffung, Vertrieb, Produkt- und Personalentwicklung in die Überlegungen mit einbezieht und damit als ein integratives Konzept zu verstehen ist. Der zentrale Begriff ist die Vermeidung von Verschwendung (Muda). Der Erfolg des Konzeptes liegt im Zusammenspiel und in der Integration der Einzelprozesse. Eine wesentliche Kernaussage beruht auf der Erkenntnis, dass zwischen den Faktoren Produktivität, Qualität und Zeit kein konkurrierendes Verhältnis bestehen darf, sondern auch eine komplementäre (ergänzende) Beziehung bestehen soll. Ein Schlüssel für die Erfolge liegt einerseits in der besonderen Bedeutung, die dem Produktionsfaktor „menschliche Arbeit“ im gesamten Wertschöpfungsprozess eingeräumt wird, und andererseits in der gezielten Anwendung von Gruppenarbeit auf allen Unternehmensebenen. Hierfür gibt es aber keine abgeschlossene Theorie oder ein genau definiertes Verfahren, es sind die Grundsätze selbst, die zum gewünschten Resultat führen. Die Umsetzung der Grundsätze kann in verschiedene Methoden zusammengefasst werden. Zu den wesentlichen zählen:

- Automatisierung und Prozessoptimierung
- Teamarbeit und Mitarbeiterintegration
- Kaizen
- Total Quality System
- Kanban
- Muda (Verschwendung).

Vergleiche hierzu auch die Definition im Anhang unter Kapitel 9.

5 Allgemeine Anforderungen an den Prozess

5.1 Kernkompetenz und Fertigungstiefe

Die Fertigungstiefe, Formel (10), ist laut Definition der Teil der Wertschöpfung, welcher in Eigenregie erzeugt wird.

$$\text{Fertigungstiefe [\%]} = \frac{\text{Eigenfertigung}}{\text{Eigenfertigung} + \text{Fremdbezug}} \quad (10)$$

Als einen der Erfolgsfaktoren nannte SIMON [Sih 07] die enge Definition des Kerngeschäftes. Tabelle 12 zeigt die entscheidenden Schritte bei der Herstellung des Bauteils. Unterschieden wird, ob die notwendige Aktion als Kernkompetenz anzusehen ist oder nicht.

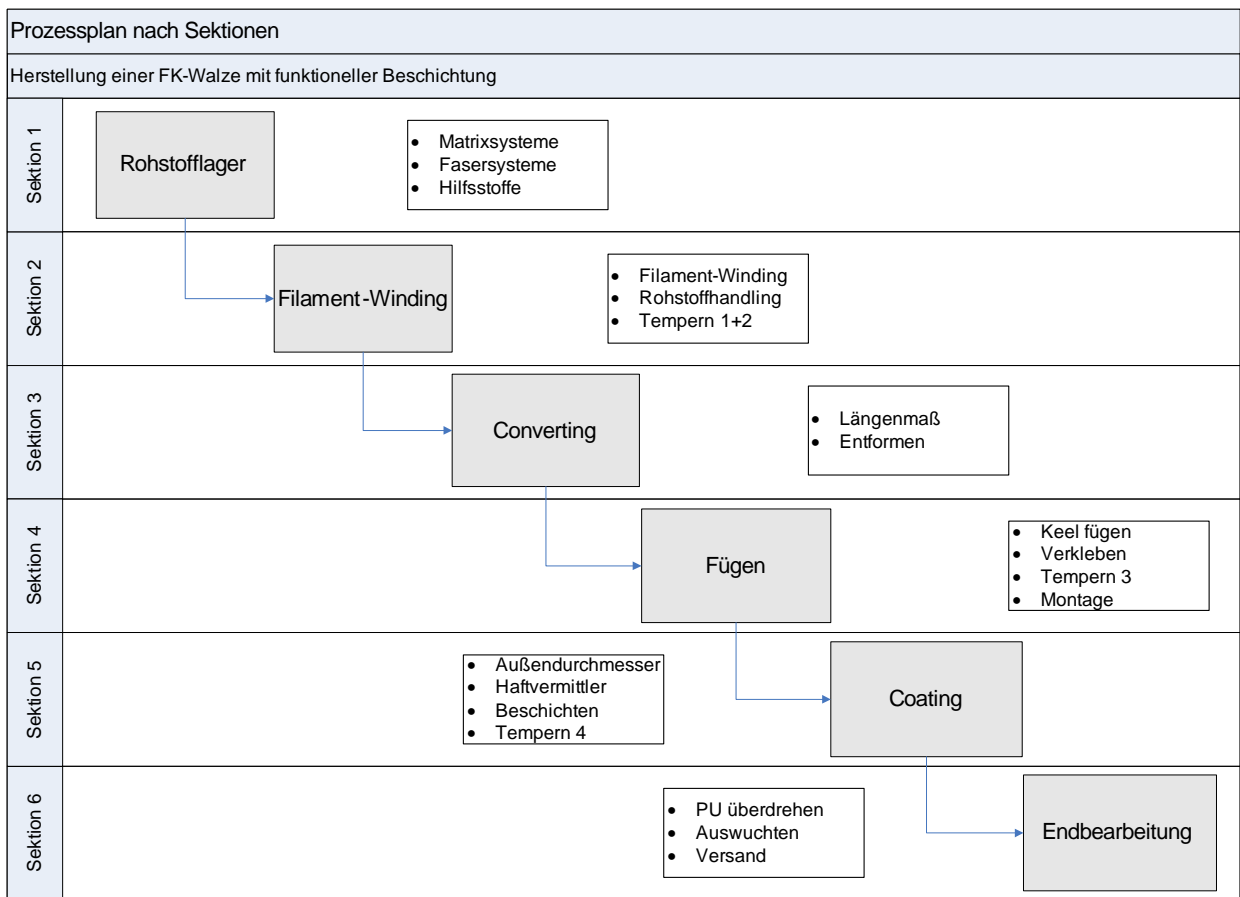
Tabelle 12: Unterteilung der Fertigungsschritte nach Kernkompetenz im Fallbeispiel

Aktion	Kernkompetenz	Kernkompetenz
	Ja	Nein
Auslegung Bauteil mechanisch	x	
Auslegung Bauteil chemisch	x	
Herstellung Keels		x
Herstellung Stirnseitenabdeckung		x
Herstellung Faserverbundrohr	x	
Formulierung PUR	x	
Applikation PUR	x	
Fügen Keels	x	
Endbearbeitung	x	
Wuchten	x	

Die Herstellung der Krafteinleitungselemente und der Stirnseitenabdeckung ist nicht als Kernkompetenz zu sehen. Den notwendigen Maschinenpark in Kombination mit der geringen Auslastung würden die Kosten und folglich den Ertrag des Gesamtproduktes nur negativ beeinflussen. Der Zukauf dieser Elemente ist wirtschaftlich sinnvoller als die Eigenherstellung. Eine breite Zulieferlandschaft bietet hier zudem eine ausreichende Wahlmöglichkeit.

5.2 Prozessbeschreibung

Im klassischen Prozess sind die abgegrenzten Abteilungen meist räumlich, oft sogar örtlich voneinander getrennt. Die Anzahl und Reihung der Abteilungen ist im klassischen als auch Leanen Prozess identisch und folgt dem Wertstromgedanken. Dies bedeutet zwangsweise nicht, dass diese auch räumlich identisch aufgebaut sind. Der Herstellungsprozess ist in Abbildung 22 dargestellt. Dieser ist unterteilt nach den funktionellen Bereichen, im Weiteren als Sektionen bezeichnet. Jede Sektion bildet in sich die kleinste mögliche geschlossene Bearbeitungseinheit.



by TMa

Abbildung 22: Herstellungsprozess unterteilt nach Sektionen

5.2.1 Sektionen

Im Folgenden werden die Sektionen im Detail beschrieben.

5.2.1.1 Sektion 1 Rohstofflager

Das Materiallager für Roh- und Hilfsstoffe hat verschiedene Aufgaben im Produktionsprozess:

- Zeitüberbrückung zwischen Warenverfügbarkeit und Bedarf [GKA 07]
- Verhindern von Engpässen in der Produktion
- Kompensation von jahreszeitlichen Klimaschwankungen.

Gleichzeitig, somit im Widerspruch, soll eine größere Kapitalbindung verhindert werden [MS 09]. Als Pufferlager soll der Mengenbedarf von einer Arbeitswoche integriert sein. Das Lager wird konventionell an einem Tag in der Woche neu aufgefüllt. Die Lagerzuführung wie -entnahme wird nach der Methode „first in, first out“ gehandhabt. Als Lagerart wird ein Regallager mit statischer Bewegungsform gewählt. Um Produktionsschwankungen ausgleichen zu können, ist das Lager an das ERP-System [Ber 01] angeschlossen, kommuniziert jedoch nicht direkt mit den Lieferanten. Im konventionellen Prozess erfolgt die Bedarfsmeldung noch über eine mannbezogene Auslösung der Bestellung, ist somit nicht direkt an den Abfluss gekoppelt, vgl. den definierten Wochenbedarf im Anhang unter Kapitel 9. Das Materiallager wird nur wareneingangsseitig befüllt und produktionsseitig entnommen. Über eine Rampe kann es idealerweise durch Lkws versorgt werden. In der Regalwand lagern Betriebsstoffe sowie Kleinteile auch für die Instandhaltung. Die

Keels werden in dreistufigen Europlatten gelagert. Lediglich Verpackungsmaterialien sind hier von der Lagerhaltung ausgenommen. Diese werden beim Versand angeliefert und dort unmittelbar verwendet. Dies verhindert, dass das Material durch die gesamte Fertigung transportiert werden muss, vgl. hierzu Abbildung 89.

5.2.1.2 Sektion 2 Filament-Winding

Der Filament-Winding-Prozess ist ein Verfahren zur Herstellung von rotationssymmetrischen Körpern [NM 04], [Fun 96]. Diese Technologie fand ursprünglich ihre Ansätze im Jahr 1947. Als erste Anbieter von Maschinen können in den USA Mc-Clean-Anderson und in Europa die Firma Bolenz & Schäfer (heute EHA Composite Machinery GmbH) genannt werden. Inzwischen hat sich diese Technologie als auch die Anzahl der Produzenten für Filament-Winding-Anlagen deutlich vergrößert. Zuerst wurde das Verfahren für rotationssymmetrische Bauteile entwickelt. Mittlerweile werden auch leicht davon abweichende Konturen hergestellt, jedoch mit deutlich höherem Aufwand. Das auch als Wickelverfahren beschriebene Herstellungsverfahren ist eines der wenigen Technologien im Bereich der Langfaserverstärkung welches bereits erfolgreich in Großserie eingesetzt wird. Als Beispiel kann hier der Rohrleitungs-, Sportgeräte- oder Druckbehälterbau genannt werden, vgl. hierzu im Anhang Kapitel 9.

Einflussgrößen im Wickelprozess

Die gebräuchliche Wickelgeschwindigkeit liegt bei größer gleich 24k-C-Fasern, je nach Wickelwinkel, bei 60 bis 90m/min [Tma 11]. Die Imprägnierzeiten und die Wickelgeschwindigkeiten verhalten sich umgekehrt proportional. Bei der Verwendung von schweren Fasern, üblicherweise größer 24k, ist dem Imprägnieren eine höhere Bedeutung zuzumessen. Folgende Größen nehmen primär Einfluss auf den Prozess [Roj 97]. Die Abbildung 23 zeigt eine Übersicht der Einflussparameter.

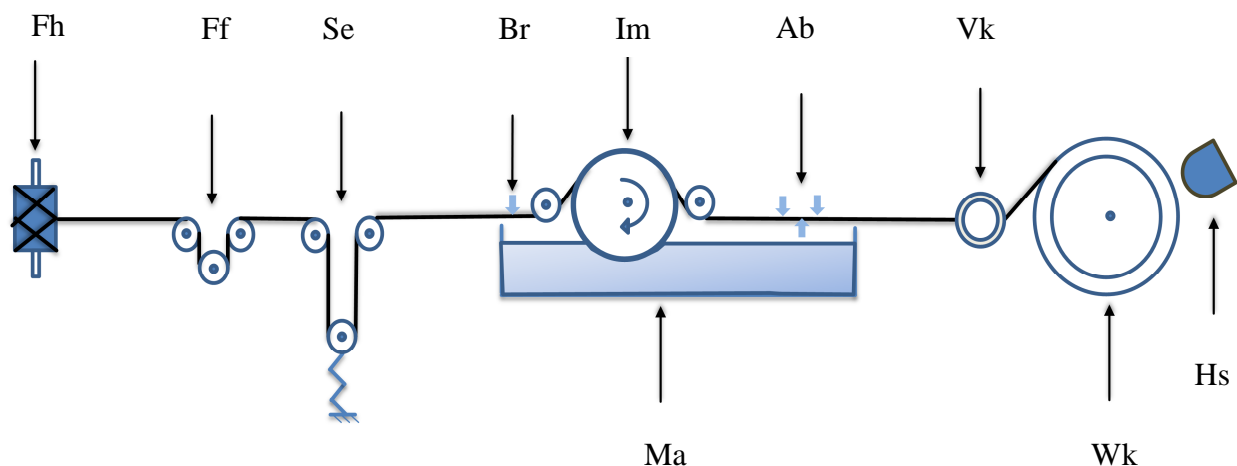


Abbildung 23: Einflussgrößen im Wickelprozess [Roj 97], [Tma 11]

Faserhalbzeug (Fh)

Die verwendete Kohlenstofffaser ist auf einer dickwandigen Pappspule aufgewickelt, vgl. Abbildung 91 im Anhang Kapitel 9, welche zum einen als Wickelträger und zum anderen als Aufnahme im Spulenständer dient. Über die Pappspule wird der Fadenzug aufgebracht. Die Spulen haben eine Einmalfunktion und werden im Anschluss entsorgt. In der Regel werden pro

Spule etwa 2.500 Meter 48k-Kohlenstofffaser aufgewickelt. Die verwendeten Fasern tragen eine Epoxy-Schichte an der Oberfläche, um die Haftung mit der verwendeten Matrix zu verbessern. Im Englischen wird hierfür auch der Begriff „Sizing“ verwendet. Die Schichte nimmt Einfluss auf das sogenannte „Fuzzing“, eine Beschreibung für einen Zustand, bei dem ein nennenswert hoher Anteil der Filamente bricht und „abflust“.

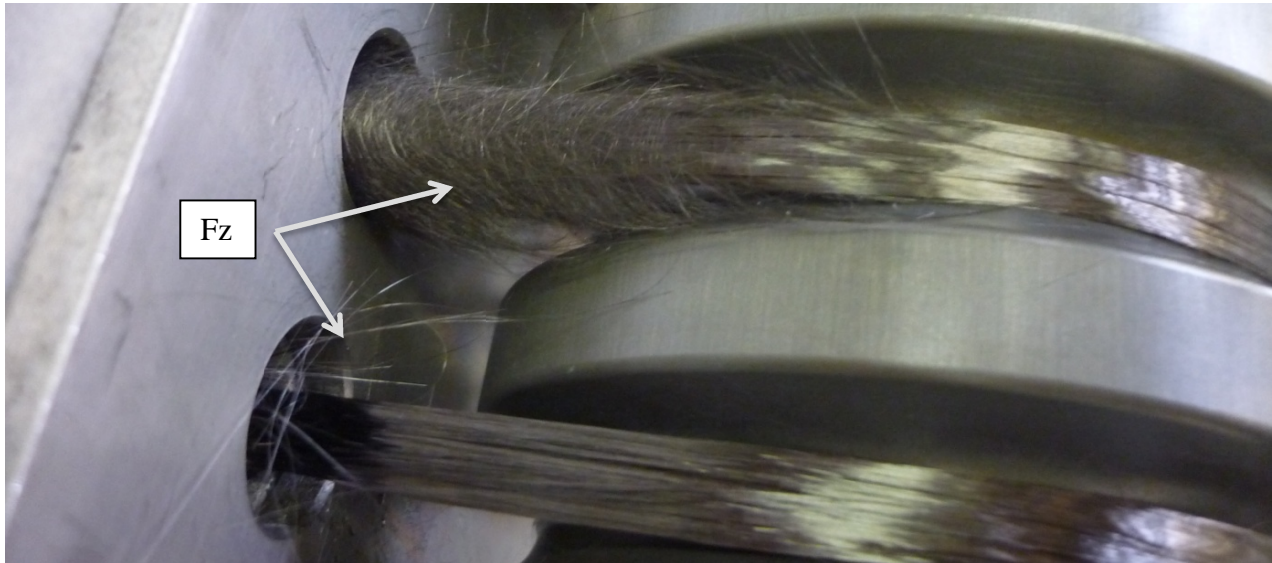


Abbildung 24: Typischer Fuzz im Umlenkbereich [FRP 08]

Die Abbildung 24 zeigt einen für den Filament-Winding-Prozess kritischen „Fuzz-Zustand“ (**Fz**). In weiterer Folge führt dies unmittelbar zu Störungen, insbesondere bei der rotierenden Umlenkvorrichtung, bis hin zu einer Kontamination des Imprägnierbades sowie zu Faserissen. Darüber hinaus wird die Atmosphäre belastet. Es kann dadurch zu Kurzschlüssen in elektrischen und elektronischen Geräten kommen. Weiter verantwortlich für das Fuzzing ist auch der Precursor wie der Herstellungsprozess des PANs selbst. Die für die Untersuchung verwendete Fasertyp zeichnete sich dadurch aus, dass das Imprägnieren wie auch der Fuzz-Level ausreichend gut für einen Drei-Schicht-Betrieb wie auch für die Zielgeschwindigkeiten ist.

Fadenführung (Ff)

Die Fadenführung sorgt für einen definierten Lauf der Rovings entlang der Imprägnierstrecke bis hin zur Ablage auf dem Werkzeug. Die Qualität des Wickelbauteils hängt direkt mit folgenden Anforderungen zusammen [Sch 08]:

- gleichmäßige und definierte Fadenspannung im Tränkbereich
- möglichst geringe Schädigung des Fadens an den Fadenumlenkpunkten.

Aus dem Wickelprozess heraus ergeben sich folgende Einflussparameter [Sch 08]:

- durch die Bewegung der z-Achse ergeben sich unterschiedliche Faserlängen, vgl. Abbildung 90
- dynamische Effekte aufgrund nicht konstanter Abzugsgeschwindigkeiten, zum Beispiel beim Wenden an den Polen
- die Summe der meist unterschiedlichen Reibkräfte in den Fadenumlenkpunkten.

Die Abbildung 25a zeigt eine statische Umlenkung (**S**), die Abbildung 25b zeigt eine dynamische Umlenkung (**D**). Die statische Version ist zwar befreit von „Umwicklern“, die den Prozess zum Erliegen bringen, sorgt jedoch auch für einen höheren Fuzz-Anteil.

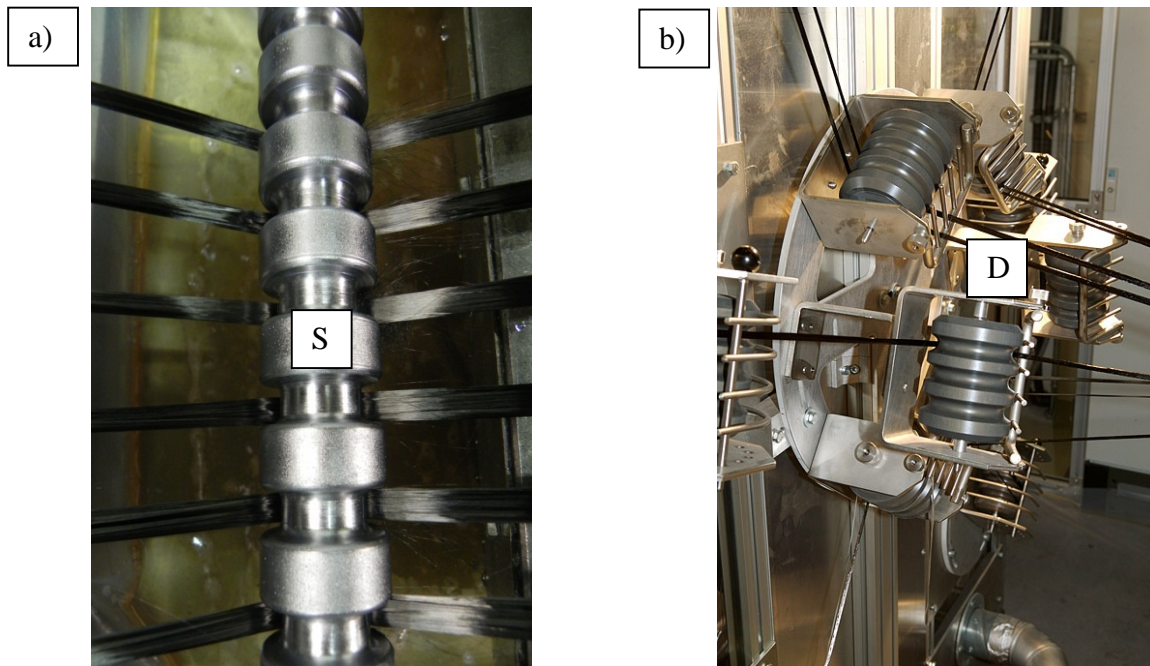


Abbildung 25: Roving-Umlenkung [FRP 08], a) Statische Umlenkung **S**, b) dynamische Umlenkung **D**

Die dynamisch Fadenführung ist sehr empfindlich gegenüber Oberflächenbeschädigung oder -verschmutzung und neigt zum Umwickeln. Problematisch ist somit die Streuung der Reibkräfte in den Umlenkpunkten, welche unter anderem von folgenden Parametern abhängig sind:

- Fadenspannung des Rovings
- Umlenkwinkel sowie die damit verbundenen Reibwerte.

Spanneinheit (**Se**)

Konventionelle Filament-Winding-Anlagen verfügen entweder über mechanisch oder elektro-mechanisch gebremste Spulenstände, mit dem Ziel, eine möglichst konstante Faserspannung aufzubringen. Die neueste Generation arbeitet über mechatronische Faserspannungsregelungen, welche höchst konstante Kräfte auf den Roving ermöglichen. Damit werden Dynamik und Qualität sehr positiv beeinflusst.

Brecher (**Br**)

Dem Brecher oder Harzabstreifer kommen in diesem Prozess mehrere Aufgaben zu. Bei der Positionierung vor der Tränkwalze soll der Roving erstens maximal breit gelegt werden. Zweitens muss, besonders bei Heavy-Tow-Fasern, bei einem etwaig zu hohem Schlichteanteil der Roving aufgebrochen werden. Geschieht dies nicht, besteht die Gefahr, dass die Imprägnierung nur unvollständig erfolgt. In der Positionierung nach der Tränkwalze soll überschüssiges Matrixmaterial von der Oberfläche des Rovings entfernt sowie für eine vollständige Imprägnierung gesorgt werden. Bei der untersuchten Imprägnierstrecke besteht dieser Bereich aus drei Elementen, wobei das mittlere nicht fest arretiert, sondern mit einem Freiheitsgrad in senkrechter Richtung versehen ist.

Die Imprägnierstrecke (Im)

Vollständig imprägnierte Fasern sind Voraussetzung für einen nahezu porenfreien FKV. Die Prozessschritte Imprägnierung, Konsolidierung und Solidifikation müssen hierfür durchlaufen werden [Hef 05]. Versuche, die Filament-Winding-Anlage mit den definierten Harzsystemen im Drei-Schicht-Betrieb zu betreiben, zeigten unter anderem folgende Schwächen auf: a) Nach einigen Stunden lagerte sich im Imprägnierbad eine nennenswerte Anhäufung von Faserresten an. Zuerst wurden Versuche unternommen, diese Faserreste mithilfe von Sieben zu entfernen. Jedoch war die Kontamination nie gänzlich zu eliminieren und die Zeit bis zum nächsten Reinigungszyklus wurde stetig kürzer. Aus diesem Grund wurde in das Imprägnierbad, bevor die Beschlagteile montiert wurden, eine Folie eingelegt. Die Abbildung 26 zeigt die Imprägnierstrecke mit den verwendeten Elementen.

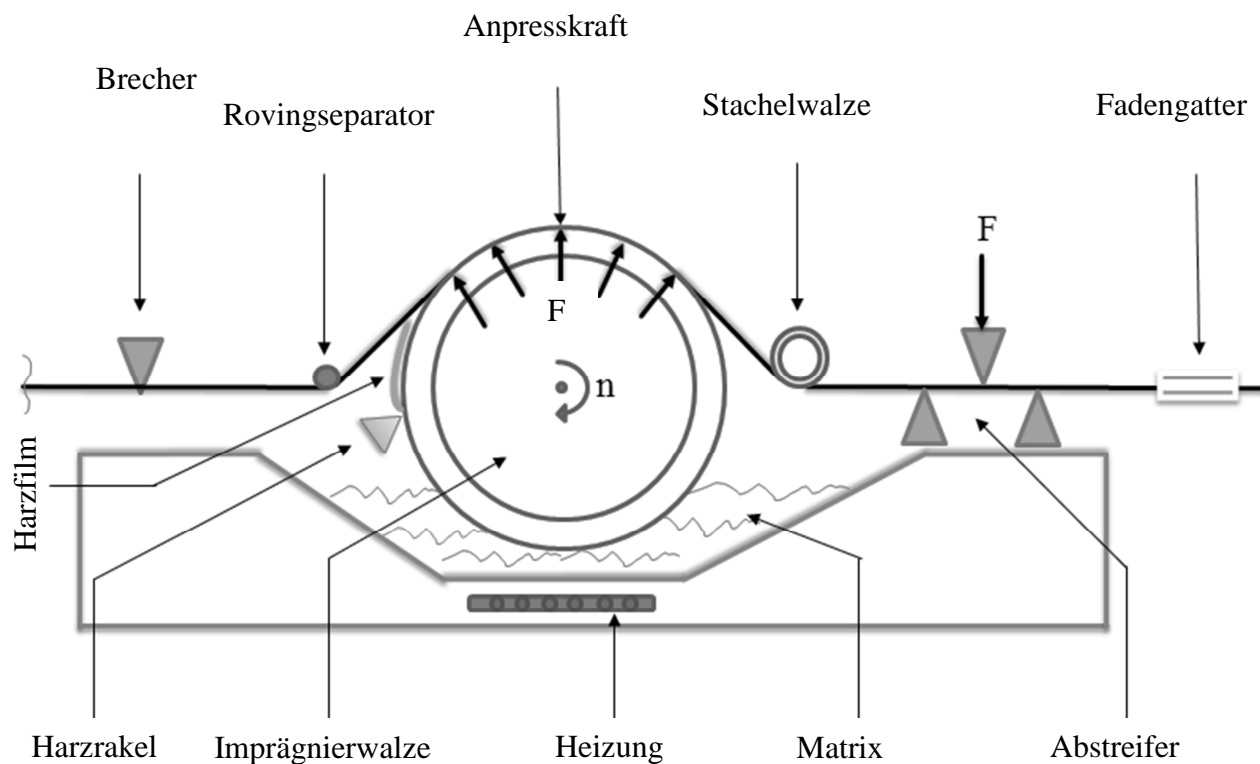


Abbildung 26: Einflussparameter Imprägnierbad [Roj 97], [TMa 11]

Diese Einlegefolie ist so gestaltet, dass diese mithilfe spezieller Niederhalter den Betrieb nicht negativ beeinflusst. Abhängig von der Fahrgeschwindigkeit wurde das Imprägnierbad nun zwischen sechs und acht Stunden komplett gereinigt. Dies geschah dadurch, dass die Beschlagteile entfernt, die Folie mit dem restlichen Harz ausgehoben, eine neue Folie eingebracht und die Anlage für den Betrieb erneut gerüstet wurde. b) Strömungstechnisch verarmte Bereiche in der Imprägnierwanne fördern die Gefahr der Exothermie und somit den „Notstopp“ der gesamten Anlage.

Rovingseparator

Der Rovingseparator, im Weiteren als „RS“ bezeichnet, leitet die erste große Umlenkung der Rovings im Imprägnierbad ein. Das Organ sorgt dafür, dass die Fäden mit ausreichendem Abstand und maximaler Breite auf die Imprägniertrommel geführt werden. Eine maximale Bandbreite des Rovings fördert die Imprägnierung. Abbildung 27a zeigt ein Werksbild der Firma EHA Composite Machinery GmbH mit einem mitlaufenden Rovingseparator. Der Vorteil dieses Systems ist, dass es zu einer sehr geringen Reibung zwischen dem Roving und dem Separator kommt. Nachteil ist, dass abhängig von Verschmutzung und Qualität des Rovings es zu einem Umwickeln und somit zu einem Zwangsstopp der Filament-Winding-Anlage kommen kann.

Im Vergleich hierzu hat der stehende **RS**, siehe Abbildung 27b, nicht die Möglichkeit, sich mit dem Roving zu umwickeln. Verunreinigungen, meist hervorgerufen durch aufgespritzte Harzmasse werden durch die Rovingbewegung zwangsgereinigt. Je nach verwendetem Material kommt es durch Abrasion zu Einlaufstellen an den Kontaktflächen. Abbildung 27c zeigt eine Weiterentwicklung des stehenden Rovingseparators. Zusätzlich eingebrachte umlaufende Rillen führen den Roving immer in konstanter Position. Tatsache ist jedoch, dass durch die Relativbewegung zwischen Roving und fest stehendem **RS** ein höherer Trend zur Faserschädigung zu beobachten ist.

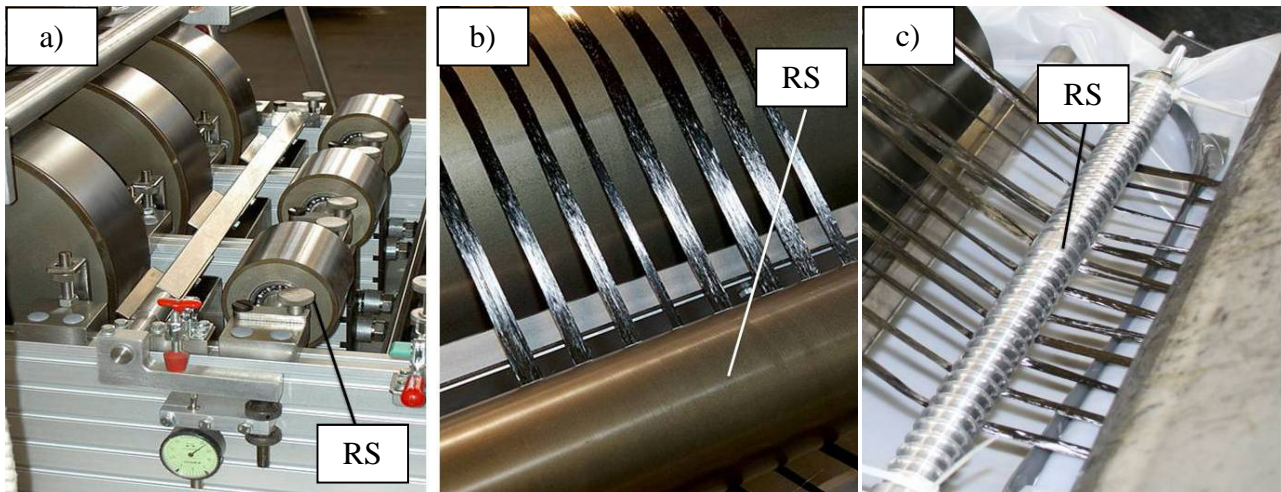


Abbildung 27: Rovingseparatoren RS, a) Mitlaufender RS [EHA 11], b) Stehender RS [FRP 08], c) Taillierter RS [FRP 08]

Imprägnierung (**Im**)

Die Imprägnierung des Rovings wird ermöglicht durch seine Permeabilität als auch durch die Vorspannkraft, welche eine Normalkraft F_N erzeugt. Diese Normalkraft erzeugt über der Dicke des Rovings eine Druckdifferenz [Roj 97]. Über die Imprägnierwalze, Abbildung 26 und Abbildung 28, mit dem Radius r_0 wird der Roving mit dem Winkel γ aufgespannt. Durch die Kräfte F_1 und F_2 (Rovingzug) wird die Walze mit einer Drehzahl n in Bewegung gesetzt. Der Rovingzug verursacht die Normalkraft F_N in senkrechter Richtung sowie die Reibungskraft F_R in tangentialer Richtung.

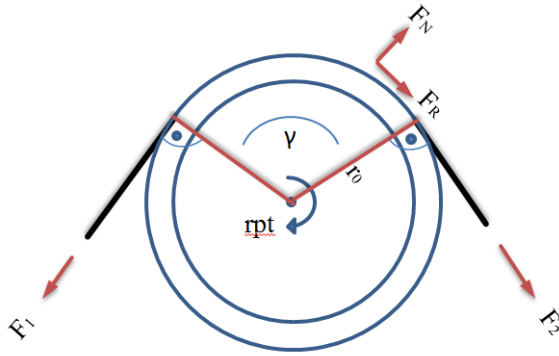


Abbildung 28: Kräftesituation an der Imprägnierwalze [Roj 97]

Mithilfe der Euler-Eytelwein-Formel (11) lassen sich die Kräfte (F_1 und F_2) berechnen, mit der Annahme, dass es zu keiner Seilreibung kommt. Demnach haftet das Seil auf dem runden Körper, wenn für das Verhältnis der beiden Kräfte am Seilende gilt.

$$e^{-\mu_H \gamma} < \frac{F_1}{F_2} < e^{\mu_H \gamma} \quad (11)$$

Der Haftreibungskoeffizient wird in der Ungleichung durch μ_H beschrieben. Eine Lagerreibung wird hierbei nicht beachtet und gilt gleich nicht vorhanden. Gleitet der Roving auf der Walze, ergibt sich nach der Euler-Eytelwein-Formel (12).

$$F_2 = F_1 e^{\mu_H \gamma} \quad (12)$$

F_2 bezeichnet die größere, F_1 die kleinere der beiden Seilkräfte. Zu beachten ist aber, dass bei steigendem Rovingzug (auch bei unverändertem Haftreibungsbeiwert) sowie der Reduktion des Imprägnierwalzendurchmessers die Scherspannung am Roving zunimmt und Schädigungen an der Faser steigen. Höhere Imprägniergeschwindigkeiten können erreicht werden, wenn der Umschlingungswinkel vergrößert oder die Rovingdicke verringert wird.

Imprägnierbadtemperatur

Im konventionell dargestellten Prozess wird das Laminiersystem zwar mit einer 2k-Misch- und Dosieranlage (MD) verarbeitet, jedoch mittels Eimer (meist zehn Liter) von der MD-Station zum Imprägnierbecken transportiert und dort eingefüllt. Bei den mittelständisch untersuchten Firmen kann dies als Standard bestätigt werden. Dies führt zwangsweise zu einer ungewollten Schwankung der Harzbadtemperatur.

Der Mittelwert im konventionellen Prozess lag bei circa 56 °C mit Tendenz zur leichten Steigerung während der Prozesszeit. Beim Versuch, die Imprägnierstrecke dahin gehend zu automatisieren, dass das Harz unmittelbar in das Imprägnierbad gefördert wird, stellte sich folgende Situation ein: Die ursprüngliche Schwankung lag im Bereich von 15 K. Besonders auffällig war die Schwingungsbreite der Regelung, vgl. Abbildung 29.

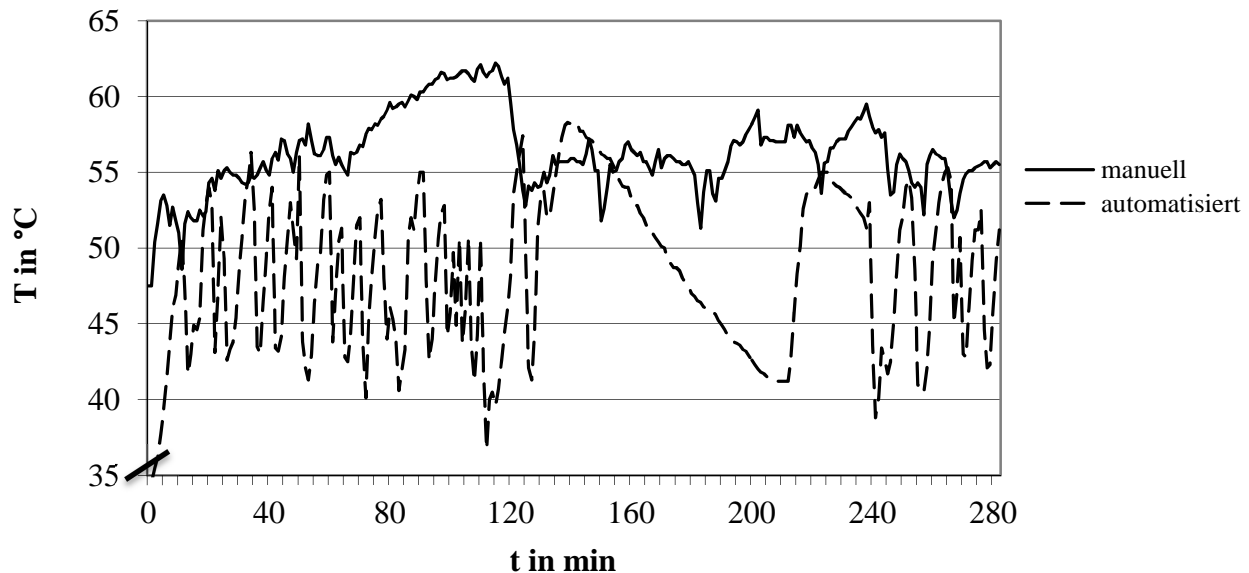


Abbildung 29: Versuchsaufzeichnung des Temperaturverlaufs über der Zeit [TMa 11]

Lange Versorgungswege stellten sich als ein Problem heraus. Mithilfe von dauerhafter Zirkulation kann das Problem aber eingegrenzt werden, jedoch aufgrund der Massenerhöhung der bewegten Teile leidet die Dynamik darunter. Es empfiehlt sich daher, bei längerem Anhalten der Maschine, zum Beispiel beim Wechseln der Spulen, die Heizung des Harzbades automatisiert anzupassen.

Stachelwalze

Der Stachelwalze sind im Prozess folgende Aufgaben zugeteilt: a) Erstens soll nach erfolgter Imprägnierung die Homogenität der Harzverteilung über die Dicke verbessert werden, b) zweitens sollen bei einer ungeplanten Umwicklung mithilfe einer Klinge die Rovings in Längsrichtung, vgl. Abbildung 30a, durchgeschnitten werden können, ohne die Walze derart zu verletzen, dass weitere Fasererletzungen provoziert werden.

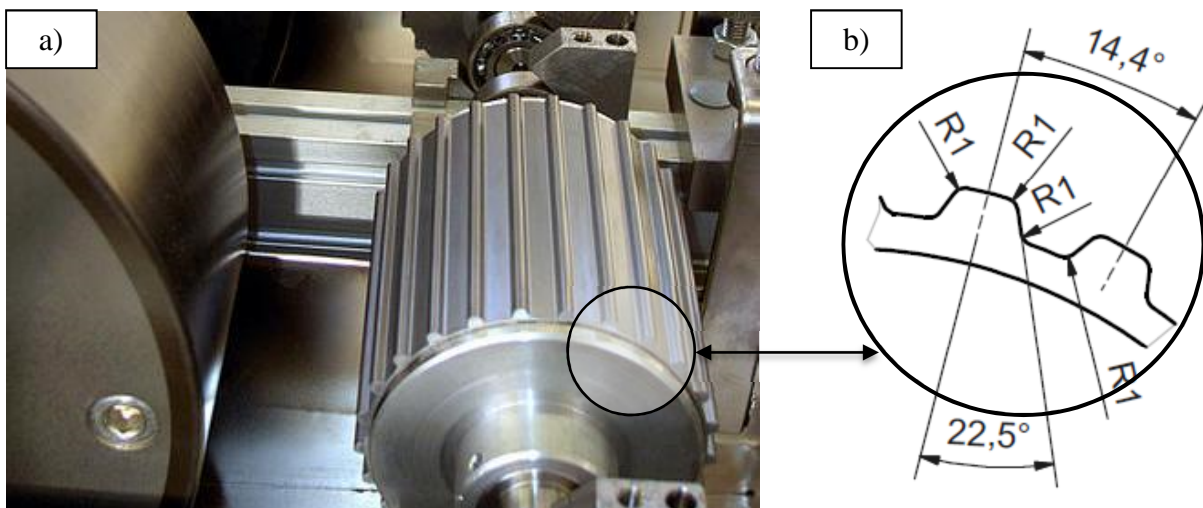


Abbildung 30: Stachelwalze [EHA 11], a) Gesamtansicht, b) Detail

Jedoch zeigte sich im Betrieb, dass die Stachelwalzen zwar weniger lang dem Betrieb standhalten, aber von der Beschaffungsseite deutlich kostengünstiger sind, da das profilierte Rohr als preiswertes Halbzeug einfach zu beschaffen ist. Die Walze hat 80 mm im Außendurchmesser, die

Stacheln weisen eine gleichmäßige Teilung von $14,4^\circ$ auf, siehe hierzu Abbildung 30b. Weiterhin wurden auch Untersuchungen angestellt, verchromte Stahlwalzen zu verwenden, welche in Längsrichtung mindestens viermal mit einem Radius von 2 mm gefräst sind, um hier das Messer im Falle eines Umwickelns zu führen. Es zeigte sich aber, dass die Rillen sich im Laufe der Zeit zusetzten und scharfe Kanten erzeugten.

Fadengatter

In der Regel sind Filament-Winding-Imprägnieranlagen mit zwei Fadengattern ausgelegt. Im trockenen Bereich werden gerne auswechselbare Ösen benutzt, vorzugsweise keramischer Materialwahl, siehe Abbildung 31a, um auch verschleißarm den Roving führen zu können. Der japanische Hersteller von UHM-Fasern, Mitsubishi Chemical, empfiehlt speziell angeraute Metallösen, siehe Abbildung 31b. Im Nassbereich hingegen werden senkrecht stehende Stifte bevorzugt, die in einer Art Kamm die Positionierung der Rovings vorgeben. Das Fadengatter hat die primäre Aufgabe, Querkräfte im Imprägnierbad auf die Rovings aufzunehmen, um somit sicherzustellen, dass die Lage der Fasern auf der Breite möglichst konstant bleibt. Abbildung 31c zeigt eine variable Fadenführung, mit dem Ziel, Reibung und somit das Fuzzing deutlich zu minimieren. Die Funktionsweise basiert auf dem Ansatz, dass der Halter sich selbstzentrierend nach dem Fadenzug richtet. Die mit der Abzugsgeschwindigkeit synchron rotierende Führungsrolle stellt dem Roving die geringste Reibung zur Verfügung. Weiterhin sind diese Rollen mit einer Bürste ausgestattet, die verhindern soll, dass der Fuzz in den nassen Bereich transportiert wird. Diese Maßnahmen sind besonders dann von großem Interesse, wenn die Filament-Winding-Anlage in einem Dreischicht-Betrieb mit möglichst geringen Stillstandszeiten betrieben werden muss, vgl. im Anhang unter Kapitel 9 die Abbildung 98 mit der Kennzeichnung **K1**. Die Abbildung 98 zeigt eine Anhäufung von Fuzz, dieser entsteht jedoch nicht am Fadengatter selbst, sondern hauptsächlich im trockenen Bereich und wird dann stochastisch durch das Imprägnierbad gezogen und sammelt sich am Fadengatter wieder an. Diese Anhäufungen lösen sich plötzlich vollumfänglich ab und werden in der Folge auf den Kamm des Fadenauges weitergeführt und dann auf das Laminat transportiert.

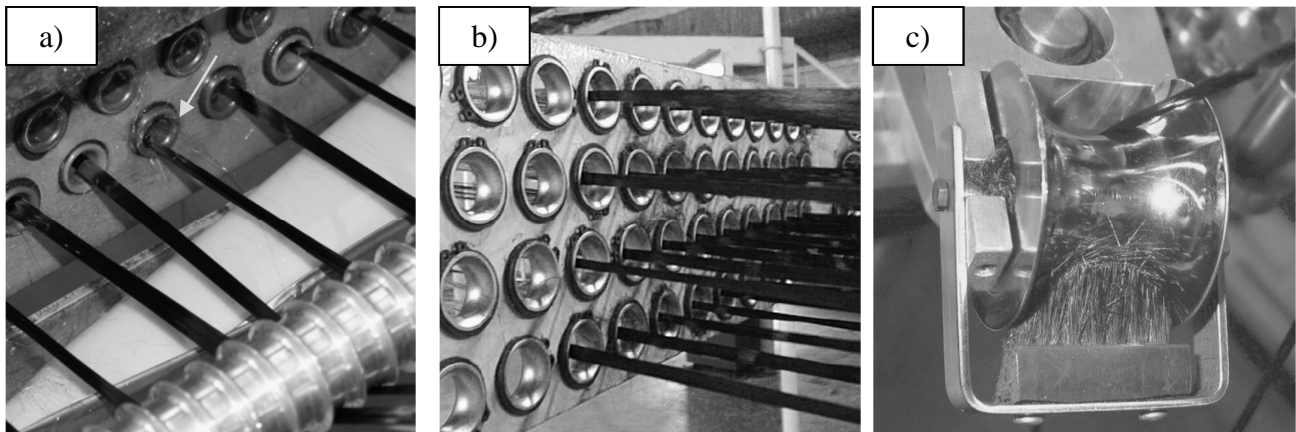


Abbildung 31: Leitorgane [FRP 08], a) Keramikauge/starr, b) Metallauge/starr, c) Variables Fadenführungssystem

Verlegekopf (Vk)

Dem Verlegekopf kommt in diesem Prozess eine zentrale Bedeutung zu. Das Verlegesystem muss in der Lage sein, das schwere Tape möglichst breit und spaltenfrei abzulegen. Es hat weiterhin die Funktion, den Kopf möglichst nahe, besonders beim Wenden, an das Laminat heranzuführen sowie bei Störungen, wie Faserabriss, leicht wieder instand gesetzt werden zu können. Abbildung 32 zeigt verschiedene Positionen, vgl. im Anhang die Abbildung 93, Kapitel 9, den Verlegekopftyp der Firma Waltritsch & Wachter GmbH (W&W), jeweils mit starrer und rollender

Fadenführung dargestellt. Eine zentrale Bedeutung hat hierbei der Kamm, welcher in der Regel kurz vor dem Austritt der Faser zum Wickelbauteil positioniert ist, vgl. Abbildung 32a. Dieser Kamm hat die Aufgabe, das Tape möglichst breit und gleichmäßig sowie unabhängig von der Fadenspannung zu halten. Das gezeigte Verlegeauge ist bei mehreren Produzenten im Einsatz [Int 12].

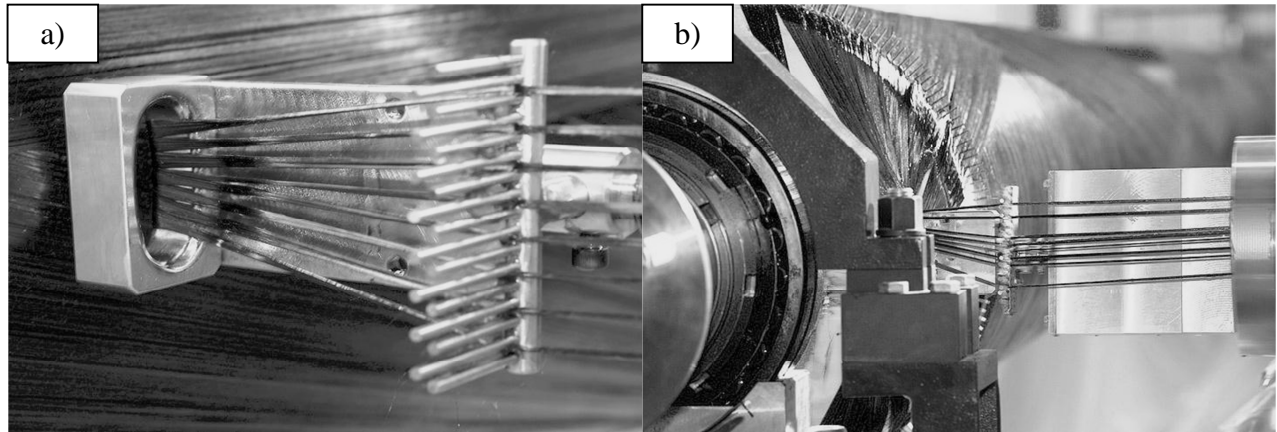


Abbildung 32: Verlegekopf in verschiedenen Positionen [TMa 11], a) Verlegekopfstellung bei 12°-Wicklung, b) Verlegekopfstellung im Polbereich

Abbildung 32b zeigt den Verlegekopf beim Einfahren in den Polbereich in einer kritischen Situation, da hier die Bänder zum „Strangulieren“ neigen.

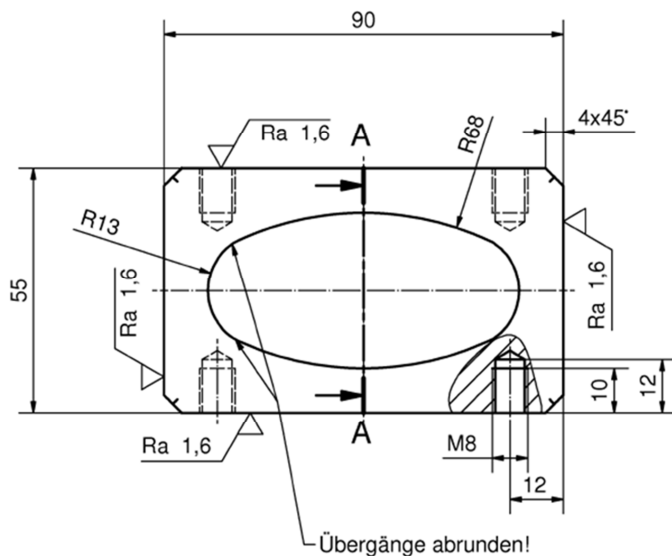


Abbildung 33: Verwendeter Verlegekopf in Frontansicht [int 12]

Abbildung 33 zeigt die Konstruktion zu dem für die Untersuchung letztendlich verwendeten Verlegekopf in Frontansicht. Gründe für die Wahl dieses Fadenauges sind folgende:

- Im Sinne der Einsatzdauer sind Optimierungen durchgeführt worden, um auf die Verwendung von rotierenden Teilen zu verzichten
- Der Verlegekopf ist so gestaltet, dass im Falle von Störungen, meist hervorgerufen durch Faserrisse, das System schnell gereinigt werden kann

- Die Geometrie des Fadenauges wurde so angelegt, dass Tapebreiten von 12 bis 16 Fasern mit bis zu 60k-Typen verlegt werden können.

Eine besondere Bedeutung kommt hierbei dem 13er- und 68er-Radius zu. Dieser sorgt dafür, dass das Fasertape sich geschlossen, somit spaltfrei auf dem Werkzeug ablegt. Auch beim Ein- und Ausfahren in die Wendebereiche (Pole) kann die Ablage nahezu fehlerfrei platziert werden. Dies ist wichtig, um den hohen Faservolumengehalt zu erreichen, als auch geschlossene Oberflächen für den folgenden Beschichtungsprozess zu erzeugen.

Faserwechsel

Die Faserproduzenten liefern in der Regel C-Faser-Spulen von 4,5 bis 10 Kilogramm als Standard [CSL 08]. Größere Spulenpackungen verlieren ihre notwendige Packungsdichte, was zu Beschädigung der Faser beim Abwickeln führen kann. Bei optimaler Bestückung aller Spulenständer, in der Regel zweimal sechs Spulen, ist es pro halbem Laminat notwendig, mindestens einen Wechsel jeder Spule im laufenden Prozess vorzunehmen. Im Erfahrungsfall ist es aber so, dass entweder die vorhandene Spulengröße kleiner 10 kg war oder die Bestückung teilweise oder ganz mit bereits angearbeiteten Spulen vom vorhergehenden Prozess gestartet wurde.

Tabelle 13: Spulenberechnung im konventionellen Prozess [TMa 11]

Wickelzeit 1/2 Laminat	Spulen	Masse Spule	Länge Spule	Tex	Wechsel pro Wickeltag
[min]		[kg]	[m]	[mg/m]	
293	12	9,5	2.969	3.200	1,3

Mit dem Ziel, Verschwendung zu vermeiden, ist es notwendig, die Spulen je bis zum Ende zu verfahren. So kann es passieren, dass unter Umständen mehrere Spulen zur gleichen Zeit oder pro Stopp getauscht werden müssen. Ein erheblicher und nicht zu unterschätzender Zeitfaktor. Im konventionellen Verfahren werden die Fasern mithilfe eines einfachen Knotens aneinander gebunden, welcher dann je nach Position wieder aus der Laminatablage herausgeschnitten werden muss. Somit wird im Extremfall die Wickelmaschine bis zu 16 Mal angehalten und die Spulen gewechselt. Dies ist im Sinne einer wirtschaftlichen und qualitativ hochwertigen Herstellung nicht akzeptabel. Die Tabelle 13 gibt die Parameter der Spulenberechnung wieder. Darüber hinaus existieren auch Verfahren zur Herstellung von spulenlosen Gebinden, exemplarisch soll EP03 34211B1 genannt werden. Die Herausforderung hierbei ist das Aufbringen geeigneter Faservorspannung.

Fadengeschwindigkeit

In Abbildung 34 wird die Verteilung der Wickelgeschwindigkeit im konventionellen Prozess über dem Laminataufbau gezeigt. Die durchschnittliche Wickelgeschwindigkeit beträgt somit 14,7 m/min. Der Grund für die im Schnitt geringe Ablagegeschwindigkeit ist erstens das Wenden um den Pol, zweitens – und am einflussreichsten – die häufigen Spulenwechsel, die den Prozess zeitweise komplett zum Erliegen bringen. Beide Faktoren reduzieren die Geschwindigkeit kurzzeitig auf null. Die Fadenabzugsgeschwindigkeit ist umgekehrt proportional zur Verweilzeit des Rovings im Imprägnierbad. Nach GELHORN [VGE 85] bleibt zwar die Strömungsgeschwindigkeit konstant, jedoch verändert sich die Harzaufnahme im Roving in Funktion der

Geschwindigkeit. Im Vergleich zu Glasfasern werden die Kohlenstofffasern mehrheitlich mithilfe der Walzentränkung imprägniert, was den Prozess sensibler gestaltet.

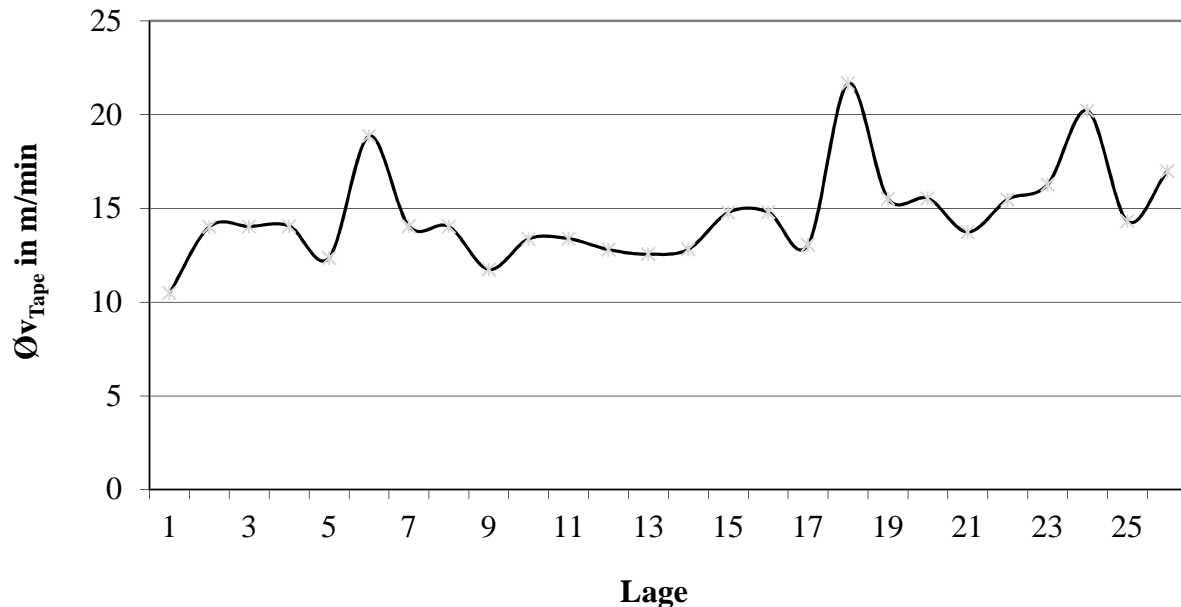


Abbildung 34: Durchschnittliche Tapegeschwindigkeit pro Lage am Untersuchungslaminat [Tma 11]

Als Richtgröße gab GELHORN als maximale Imprägniergeschwindigkeit 60 m/min an. Der Untersuchungsgegenstand wird in den Kreuzlagen mit maximal 40 m/min, in den Umfangslagen mit 60 m/min in den Spitzen gefahren. Im Schnitt werden folgende Werte erreicht:

- 90° 12,6 m/min
- 12° 13,6 m/min
- 30° 15,2 m/min.

Höhere Geschwindigkeiten ziehen eine überproportionale Harzmitnahme und somit einen geringeren Faservolumengehalt mit sich. Ebenso nimmt der Wickelwinkel einen direkten Einfluss auf den Faservolumengehalt, dies besonders bei dickwandigen Laminaten. Grund hierfür ist, dass der radiale Druck der Faser auf dem nassen Laminat, der sogenannte Verdichtungsdruck, eine Funktion von Winkel, Faserzug und Durchmesser ist. Dieser Verdichtungsdruck entspricht somit dem Normdruck am Fadenelement [FZR 99]. Die Formel setzt hierbei einen gleichmäßigen Fadenzug voraus, was allerdings bei den angelegten Verlegegeschwindigkeiten, insbesondere beim Ein- und Ausfahren in/aus den Wendezonen in Verbindung mit den angelegten Beschleunigungen als nicht ideal linear angesehen werden darf.

Laut GELHORN [VGE 85] sollte die Fadenkraft pro Roving wie folgt ausgelegt werden, Formel (13).

$$F_{Ro} = \frac{1 \text{ N}}{1.000 \text{ Filamente}} \quad (13)$$

Dies würde jedoch bedeuten, dass bei der verwendeten HT-Faser eine Fadenspannung von 48 N hätte angelegt werden müssen. Nach Auswertung aller Prozessdaten zeigten sich folgende Fadenspannungen als umsetzbar.

- Für die Kreuzlagen.

$$F_{Ro} = \frac{1 \text{ N}}{2.400 \text{ Filamente}} \quad (14)$$

Das entspricht einer Fadenkraft, aufgebracht am Rovingständer, von 20 N/R.

- Für die Umfangslagen ergibt sich somit eine Fadenkraft pro Roving.

$$F_{Ro} = \frac{1 \text{ N}}{1.920 \text{ Filamente}} \quad (15)$$

Das entspricht einer Fadenkraft, aufgebracht am Rovingständer von 25 N/R.

Bei dem Versuch, die Rovingkraft (F_{Ro}) über 30 N/R zu steigern, kam es zu einer Verschärfung des Fuzzlings bis hin zu Faserbrüchen. Weiterhin stieg die Welligkeit im Laminat deutlich an. Mit der gefundenen Einstellung für die Fadenspannung im untersuchten Prozess ist es möglich, auf bis zu 30mm Wandstärke in einer Toleranzklasse von plus/minus 0,6mm exakt zu wickeln. Die Abbildung 35 gibt die Verteilung des Fasergehaltes in Funktion der Fadenspannung und bei Verwendung von Abreissgewebe wieder.

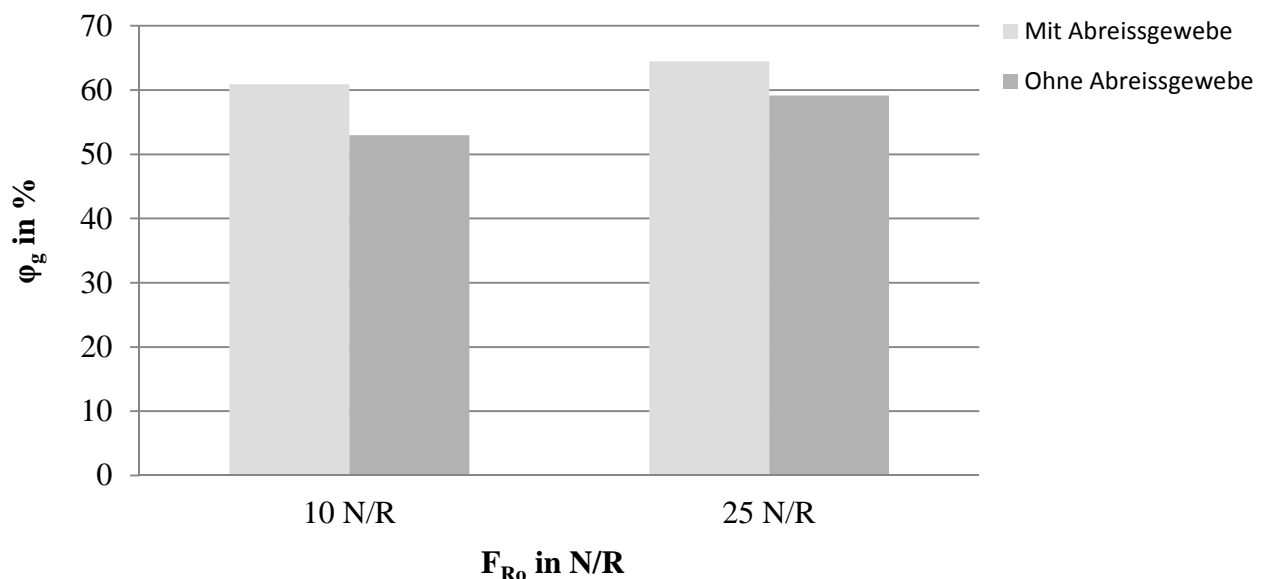


Abbildung 35: Fasergehaltspunkte bei unterschiedlicher Fadenkraft

Komprimieren

Aufgrund der Tatsache, dass der konventionelle Wickelvorgang zeitlich nahezu zweimal fünf Stunden fordert, neigt der Prozess ab dem ersten Drittel, jedoch mindestens nach der Hälfte der applizierten Wandstärke zum Abdriften der Layer-Sollvorgabe. Die notwendige Schleiflage zwingt die genaue Einhaltung des Außendurchmessers auf. Es ist deshalb notwendig, dass der „nasse“ Verbund mehrfach komprimiert wird. Hierzu wurden zwei geeignete Wege gefunden:

a) mit dem Aufziehen von einer trockenen Umfangslage aus Glasfasern. In der Regel werden hierfür vier Glasfasern zu einem Tape zusammengefasst und mit hohem Zug appliziert. Der Nachteil dabei ist, dass der Spulenständer jedes Mal neu gerüstet werden muss. Dieser Prozess, in

Bezug auf das Fallbeispiel, wurde hierfür aufgrund wirtschaftlicher Gesichtspunkte nicht weiter untersucht.

b) Aus diesem Grund wurde zum anderen folgende Vorrichtung definiert, um das Erreichen des Enddurchmessers sicherzustellen, vgl. Abbildung 36. Am Support der Wickelmaschine wird eine Bandspannungsregelung, im Bild als Spulenhalter bezeichnet, aufgebracht, die das Abreißgewebe aus Polyamidfaser (Hersteller Schlösser & Cramer KG), trägt. Dieses wird siebenfach umgelenkt, bevor es nach der Kraftmessdose auf das Laminat trocken aufgewickelt wird. Die Vorspannkraft ist mit 10 N/R definiert. Als Vorschub sind 50 mm/Umdrehung gewählt. Als Applikationsgeschwindigkeit sind 60 m/min eingestellt. Nach dem Aufbringen des Bandes werden die Heizstrahler bei einer Oberflächentemperatur von 60 °C ca. 30 Minuten rotierend bei 6 rpt/min anstehen gelassen. Dies hat zur Folge, dass überschüssiges Harz ablaufen kann. Der gesamte Zeitaufwand hierfür beträgt inklusive Rüsten ca. 45 Minuten. Bei der Verwendung dieser Vorrichtung müssen die Kohlenstofffasern nicht aus dem Imprägnierbad entfernt werden. Nachteilig bei dem Prozess ist das manuelle Auflegen des Gewebes auf die imprägnierte Oberfläche. Abhilfe hierbei können Handlingsysteme zur Übergabe textiler Verstärkungsstrukturen in komplexe Werkzeugstrukturen schaffen [SHN 10].

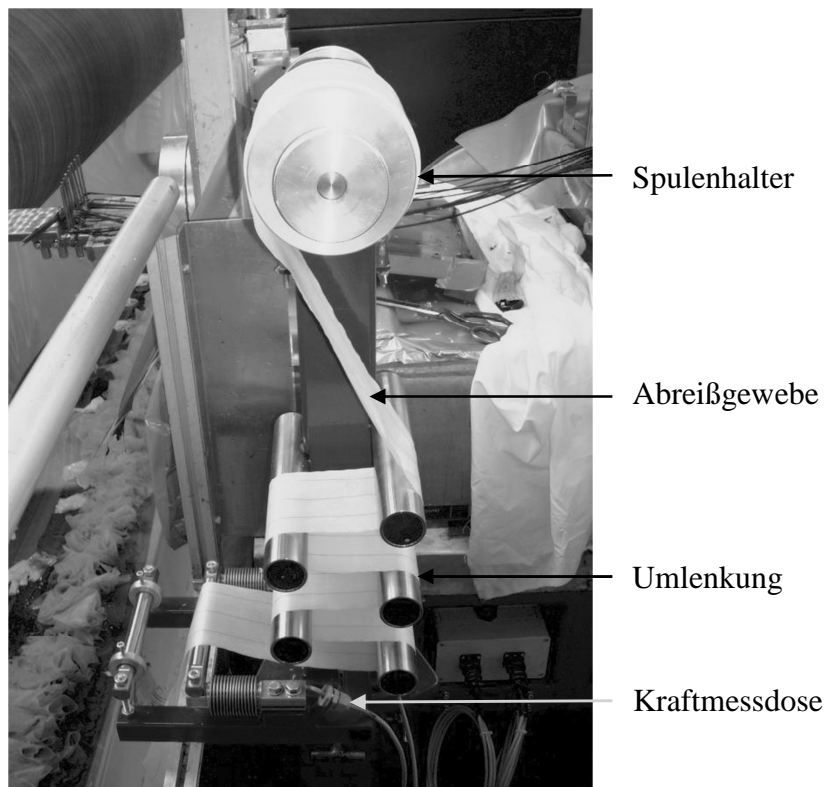


Abbildung 36: Bandspannungsregler

Werkzeuge (Wickelkerne)

Nach dem Aufspannen des Wickelkerns auf die Filament-Winding-Maschine wird dieser mit einem wässrigen oder wachsartigen Trennmittel eingerieben und im Anschluss mit einem Baumwolltuch poliert. Da der unmittelbare Kontakt des Trennmittels aber eine einwandfreie Haftung des Klebers zur FK-Oberfläche verhindert, wird über den polierten Wickelkern eine Lage Abreißgewebe mit 50% Überlappung gelegt [Tma 08]. Das Abreißgewebe wird nach dem Entformen des Werkzeuges, in der Regel unmittelbar vor dem Vermessen, entfernt. Dieser Prozess ist unkompliziert durchzuführen. Vorteilhaft bei der Verwendung von Abreißgewebe ist, dass die FK-Grenzfläche sehr gute Bedingungen für den Klebprozess aufweist. Nachteilig ist hingegen,

dass die Auflagefläche der Keels nicht plan auf der FK-Struktur aufliegt, sondern makroskopisch nur auf den Spitzen der Abreißgewebestruktur sitzt und somit eine erhöhte Flächenpressung aufweist. Abbildung 37 zeigt das Wickelwerkzeug mit aufgelegtem Abreißgewebe **A1** bis **A6** sowie Holzkorb **H**, welcher mit einem Stachelband **S** versehen ist. Das Stachelband **S** hat die Aufgabe, ein Verrutschen der Fasern beim Wenden zu verhindern.

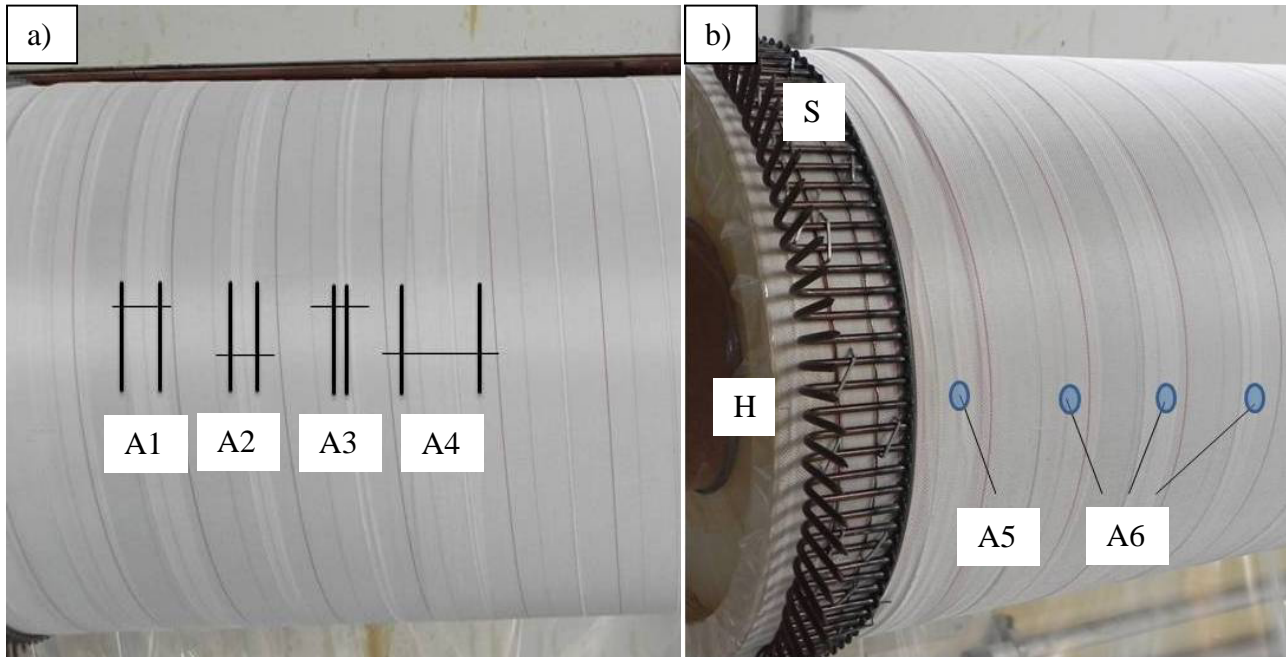


Abbildung 37: Appliziertes Abreißgewebe, a) Unterschiedliche Überlappung des AG, b) Fehlstellen des AG

Der Rüstaufwand hierfür ist sehr hoch. Die im Wickelkern eingebrachten umlaufenden Nuten, erlauben das direkte Einstechen des Laminates auf dem Kern. Mithilfe von Positionierungspunkten findet das Trennmedium, entweder Meißel oder Trennscheibe, die korrekte Position. Dadurch, dass das Werkzeug tiefer eintauchen kann, als die Wandstärke des Laminates stark ist, wird beim Entformen der Faserverbund im Inneren nicht verletzt. Ohne diese Einstiche wird das Trennmedium ca. 2 bis 5 mm vor Ende der Wandstärke außer Funktion genommen. Die restliche Tiefe muss dann mithilfe eines händisch geführten Schneidmittels durchgeführt werden.

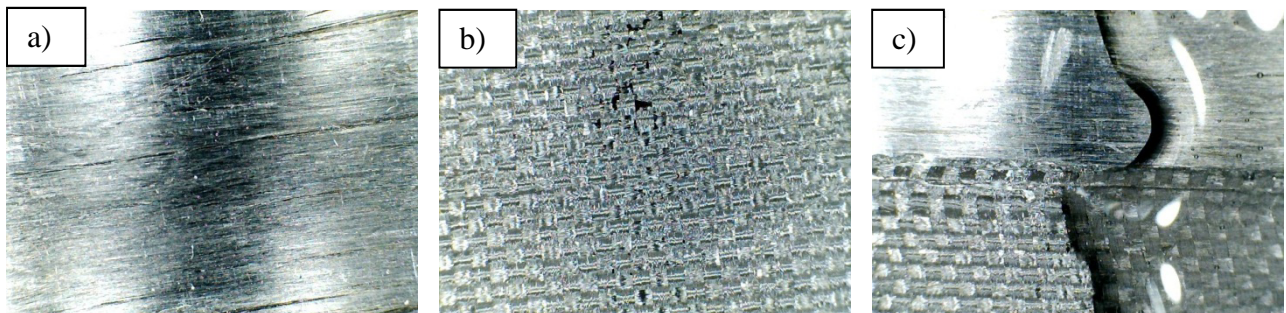


Abbildung 38: FK-Fläche [TMA 11], a) Innenfläche ohne Abreißgewebe, b) Innenfläche mit Abreißgewebe, c) Grenzverhalten von H_2O zu FK

Abbildung 38a zeigt die Rohinnenfläche ohne Verwendung von Abreißgewebe. Diese ist zum einen sehr glatt und zum anderen mit dem Trennmittel kontaminiert. Die Geometrie ist entsprechend der Qualität des Werkzeuges abgebildet, ein Verkleben ist auf dieser Fläche jedoch ohne mechanische Vorbehandlung nicht möglich. Abbildung 38b zeigt die Rohinnenfläche mit

Verwendung von Abreißgewebe. Nach dem Entfernen des Gewebes liegt eine raue und nicht mit Trennmittel versehene Oberfläche vor. Zum Verkleben sind dies gute Voraussetzungen. Nachteilig ist jedoch, dass die Schultern vom Keel, topografisch bedingt, eine lokal höhere Flächenpressung erzeugen. Abbildung 38c zeigt die Rohrinnenfläche mit und ohne Verwendung von Abreißgewebe im Vergleich. Im Bild ist die Fließfront von aufgetropftem Wasser zu sehen, die Oberflächenspannung des mit Trennmittel versehenen Teils lässt das Wasser weniger gut fließen.

Impliziertes Risiko bei der Verwendung von Gewebe an der Innenfläche

Das benutzte Abreißgewebe trägt bei einer 50%igen Überlappung ca. 0,9 mm im Durchmesser auf. Jedoch sorgen die Kanten des Gewebes für eine Störung der Oberflächenkontur, somit auch für eine potenzielle Gefahrstelle beim Vermessen der inneren Geometrie, vgl. Abbildung 37b. Wird der Drei-Punkt-Innenmikrometer an der Kantstelle angesetzt, entsteht ein nicht korrektes Maß. Dem kann nur begegnet werden, wenn jede Messposition zweimal erfasst und miteinander verglichen wird. Aus Sicht der maximalen Reproduzierbarkeit wäre somit entweder eine 50%ige Überlappung oder eine Stoß-Stoß-Ablegung ideal. Der händische Prozess hat aber gezeigt, dass hierbei starke Streuungen auftreten. Dies demonstrieren die unterschiedlichen Abstände **A1** bis **A6**. Die Entscheidung für den Verzicht auf Abreißgewebe ist für den Leanen Prozess sehr entscheidend, da ein fehlerfreies Ablegen des Gewebes in der Folge ausgeschlossen ist.

Heizstrahler

Um unabhängig von der Rauminnentemperatur möglichst konstante thermische Bedingungen auf der Laminatoberfläche zu gewährleisten, werden Infrarot-Heizstrahler (IR) verwendet. Die IR-Erwärmung nutzt, wie die Lasererwärmung auch, die Übertragung durch Strahlung aus [Gom 93]. Pro laufenden Meter wurden acht von diesen IR-Elementen, Typ Elstein FSR1000, über zwei Ebenen angebracht. Das doppelreihige Heizstrahlerpaket hat eine Höhe von circa 245 mm, wobei ein Strahler eine Bauhöhe von 62,5 mm aufweist. Hierbei ist der Regelkreis auf die Walzenoberfläche ausgerichtet.

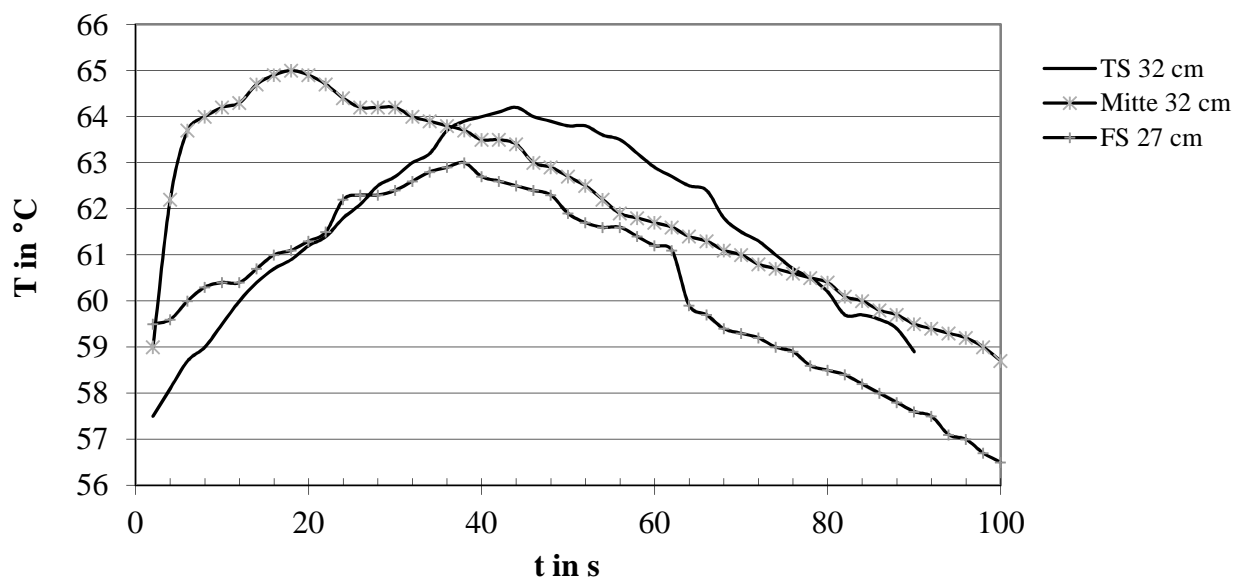


Abbildung 39: Aufnahme der Oberflächentemperatur über der Länge [TMa 11]

Aufgrund der Trägheit der IR-Strahler zeigte sich aber, dass bei Stopps, zum Beispiel beim Faserwechsel, es kurzzeitig zum Überhitzen der Faserverbundoberfläche kommen kann. Mithilfe eines Strahlungsthermometers, ein sogenanntes Pyrometer, wird die Oberflächentemperatur erfasst und das System entsprechend geregelt. Die Abbildung 39 zeigt die Ist-Aufnahme der Oberflächentemperatur an verschiedenen Positionen. Geregelt werden die Heizelemente über Pyrometer. Hiermit können berührungslos Oberflächentemperaturen gemessen und geregelt werden. Sinnvoll erweisen sich auch mechanisch dynamische Abblendsysteme zur Kompensation der Trägheitscharakteristik.

Applikation und Notwendigkeit der AST-Schicht

Der AST-Layer wird unmittelbar auf die letzte 12°-Kreuzlage gelegt. Es steht frei, ob auf die AST-Schicht als Schlusslage noch ein Abreißgewebe appliziert wird oder nicht, beide Möglichkeiten sind funktionell, vgl. Abbildung 40a. Die Entscheidung ist zum einen davon abhängig, welche Folgebearbeitung erfolgt, zum anderen von wirtschaftlichen Gesichtspunkten.

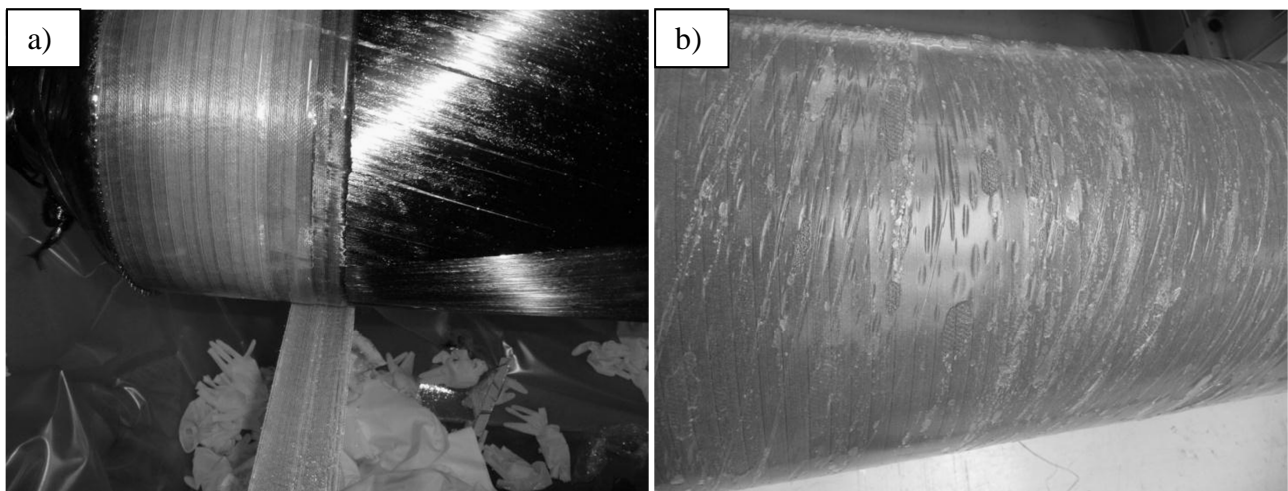


Abbildung 40: AST-Layer [TMa 11], a) während der Applikation, b) nach dem Härten

Diese Technologie weist den großen Vorteil auf, dass der AST-Layer als Barrierschicht zum porenhaltigen CFK-Unterbau dient und somit bei der Applikation des sensiblen Polyurethans wenig bis gar keine Luft ausgasen lässt [Lis 07]. Weiterhin dient die Schicht beim Recoaten als eine Art Opferschicht, die verhindert, dass die tragende und vom Materialeinsatz teure CFK-Oberfläche abgearbeitet wird. Als Nachteil ist der zeitaufwendige Prozess zu nennen. Im Regelfall geht diese Applikation mit circa 60 Minuten in die Maschinenauslastung ein. Am bedeutendsten ist jedoch der Mangel, dass bei der Anwendung Falten eingearbeitet werden, welche sich beim Abdrehen als Fehlstellen aufzeigen, zum Teil sogar lokal delaminieren, vgl. Abbildung 40b. Das Material stammt aus der GTS-Serie und besteht aus einem E-Glas.

Tempern

Der Prozess 1 dient dem ersten FW-Vorgang als Heizkurve. Der Prozess 2 wird für das gesamte Laminat, somit erster und zweiter Prozesstag, benutzt. Der gesamte Zeitbedarf für den zweistufigen Temperprozess beträgt in Summe 22 Stunden, vgl. Abbildung 41. Es sei angemerkt, dass im Produktionsmix, was bedeutet, dass ein Temperofen zugleich den ersten als auch den zweiten Wickeltag parallel zu heizen hat, gleich Prozess 2 zum Einsatz kommen muss, sodass der komplette Zyklus unbedingt appliziert wird. Dadurch ist nicht sicherzustellen, dass jedes Laminat immer dem gleichen Temperzyklus unterlegen ist. Als Heizkurve für das Verbundlaminat wurde folgender Zyklus definiert.

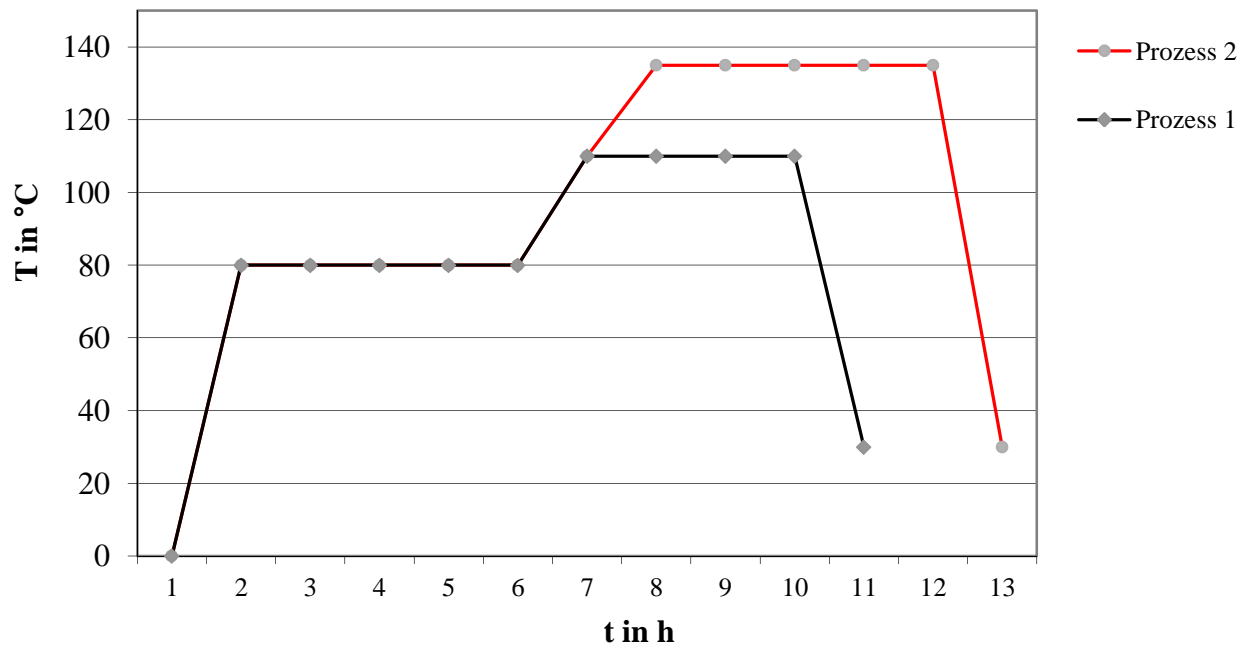


Abbildung 41: Gewählte Temperkurven für den Prozess 1 und 2 [TMa 11]

Bei Untersuchungsbeginn, ausgerichtet auf das Matrix-Material System B, kam ebenfalls ein zweistufiger Temperprozess mit 9,5 Stunden im Prozess 1 und 16,5 Stunden im Prozess 2 zum Einsatz. In Summe musste das Laminat somit 26 Stunden im Temperofen verbleiben, im ungünstigsten Fall, in Folge einer Mischbelegung des Ofens, zweimal 16,5 Stunden angelegt werden. Es liegt somit eine Zeitersparnis zum bisher verwendeten Matrix-System von sechs Stunden pro Laminat vor. Ungeachtet dessen werden dem Prozess zwei Temperstufen aufgezwungen.

5.2.1.3 Sektion 3 Converting

Der Bereich Converting (engl.: umwandeln) wird pro Laminat zweimal durchlaufen und besteht aus vier Arbeitsschritten:

- 1) **Polkappe trennen.** Für den zweiten nachgeschalteten Filament-Winding-Step sind nach dem ersten Temperprozess die Polkappen zu entfernen. Dieser Arbeitsschritt unterliegt keiner hohen Präzision, weder in Länge noch in Planheit
- 2) **Einstecken** der Polkappen und Vormaß herstellen. Hierbei sind die beim geodätischen Wickeln erzeugten Pole zu trennen und mit der Hand abzuziehen, siehe Abbildung 42a
- 3) **Entformen** des Wickelwerkzeugs. Das Werkzeug wird mithilfe einer Abziehvorrichtung entformt
- 4) **Planen.** Hierbei wird jedes Laminat einzeln und manuell auf eine Drehbank aufgenommen, auf Endmaß gebracht sowie die Frontseite geplant.

In einem späteren Optimierungsschritt wird das Planen durch ein sehr exaktes Einstecken auf einer Großdrehbank ersetzt. Hier werden mittels einer mit Diamant besetzten Trennscheibe alle Schnitte durchgeführt. Sehr aufwendig in diesem Prozess ist jedoch das Einrichten der Maschine selbst. Als Werkzeug für minimale Laminatschädigung wurde, siehe Abbildung 42b, eine mit Diamant besetzte Trennscheibe benutzt. Ein besonderer Schwerpunkt bei der Bearbeitung ist neben der Schnitltreue die Abführung der erzeugten Staubpartikel.

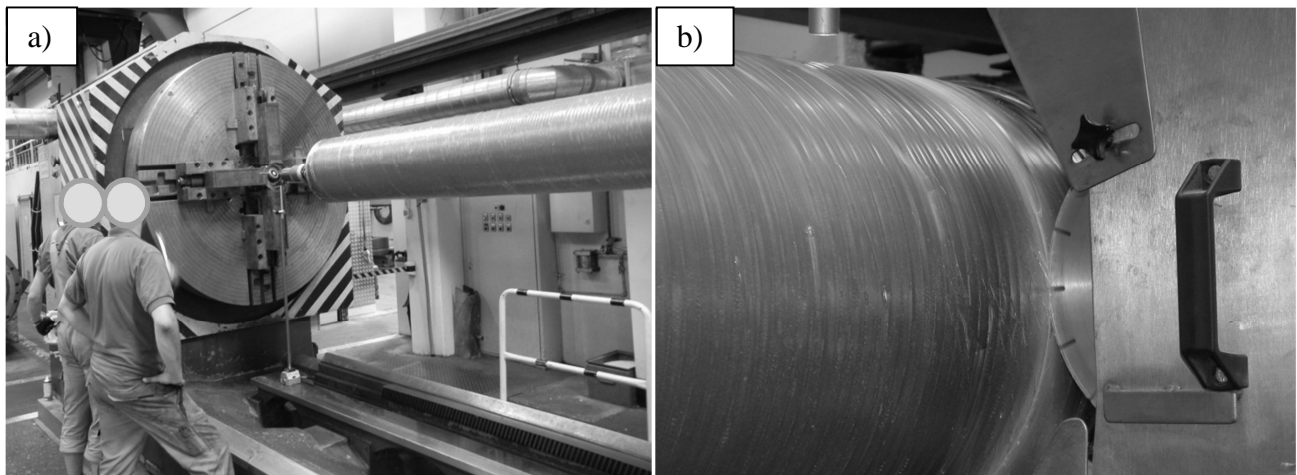


Abbildung 42: Einstechen und Portionieren [TMa 11], a) Einrichten auf der Großdrehbank, b) Ausführen des Trennschnittes

5.2.1.4 Sektion 4 Fügen

Krafteinleitungselement (KEEL)

Während sich bei metallischen Strukturen nur kraftschlüssige Verbindungen sehr gut bewähren, sind diese bei FKV-Walzen weniger verbreitet [HH 010]. Grund ist die doch sehr empfindliche Laminatoberfläche. Besonders im Flugzeugbau ist der Einsatz von Passbolzen für die Verbindung metallischer Funktionskomponenten mit duroplastischen FKV-Strukturen weit verbreitet [Heo 06], vgl. Abbildung 94 bis Abbildung 96. Jedoch sind Untersuchungen bekannt, insbesondere bei Antriebswellen [Fit 05], welche gänzlich den Pressverband fokussieren. Für die untersuchte konventionelle Type wurde daher eine Kombination aus Press- und Klebeverbindung gewählt [Gel 08], [TMa 08]. Die Abbildung 43 zeigt im Schnitt die Aufteilung der Stütz- zur Klebefläche am Keel. Für die Untersuchung wurde, so entspricht es auch der gängigen Praxis [Bav 94], ein Drittel Klebefläche und zwei Drittel Stützfläche gewählt. Idealerweise wäre die Verwendung des Abreißgewebes nur an der mittleren Stelle des Keels vorzusehen, also an dieser Position, an der später der Kleber injiziert wird. Dies setzt jedoch voraus, dass bei der Vorbereitung des Werkzeuges an den betreffenden Stellen sehr exakt das Gewebe aufgebracht und befestigt werden muss. Weiterhin birgt sektionales Platzieren von Abreißgewebe die Gefahr, dass bei den ersten Lagen dieses verrutscht oder knittert. Von daher ist es für den konventionellen Prozess am sinnvollsten, das gesamte Werkzeug mit Abreißgewebe zu versehen. Die Kraftübertragung im Laminat wird von dem Presssitz der beiden **Schultern**, im Bild bezeichnet als **Stützfläche 1** und **Stützfläche 2**, sowie dem Klebesitz übernommen. **L** beschreibt die funktionale Länge des Keels. Alternativ besteht die Möglichkeit, gänzlich auf die Klebetasche zu verzichten und den Presssitz über die gesamte Länge auszuformen. Dies hat den Vorteil, dass bei der Werkzeugvorbereitung auf die Verwendung von Abreißgewebe verzichtet werden könnte. Dies ist jedoch ein theoretischer Ansatz, welcher im Vergleich zur Klebetechnologie, bezogen auf diese Anwendung, noch nicht in der Praxis breit angewandt wird.

Die Fügetechnologie im konventionellen Prozess sieht vor, dass der Keel mithilfe von Stickstoff auf minus 80 °C abgekühlt wird. An die **Stützflächen 1** und **2**, in Relation zum FK-Innenmaß, ist vor dem Fügen ein Presssitz (Übermaß) von 0,3 mm anzudrehen, vgl. auch FISCHER [Fit 05].

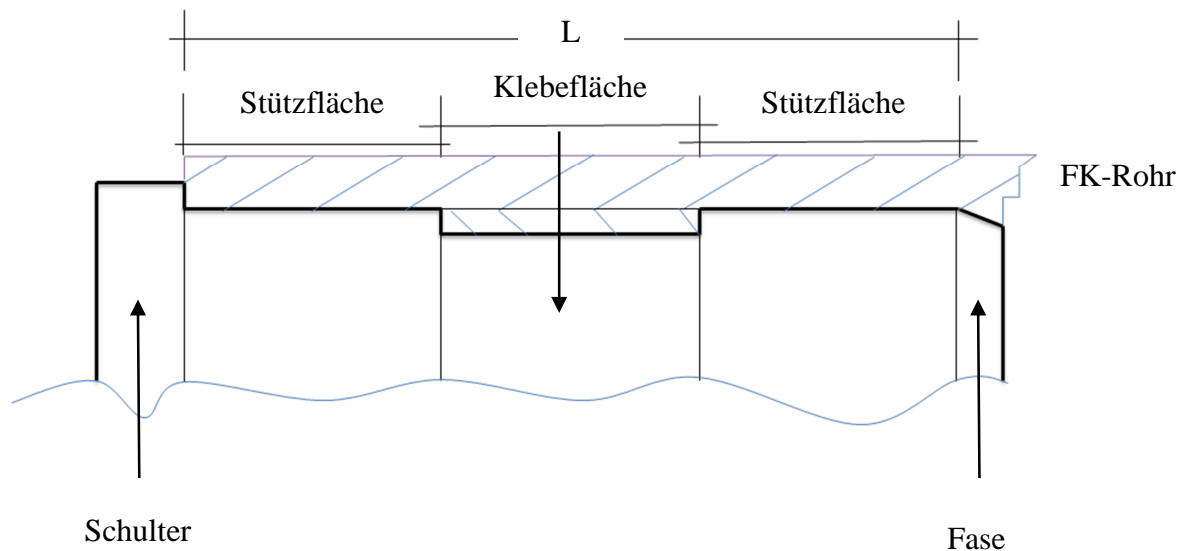


Abbildung 43: Funktionelle Skizze Keel mit Klebefläche [TMa 11]

Die Oberflächenrauigkeit an den beiden Stützflächen sind identisch, jedoch different zur Klebefläche. Mit einer Fügepresse wird das unterkühlte Metall in das FK-Rohr bis auf Anschlag eingefügt. Wenn die metallische Schulter plan mit der FK-Stirnseite anliegt, wird der Fügedruck entlastet. Der Keel akklimatisiert sich thermisch nun wieder auf Raumtemperatur und expandiert dabei im Durchmesser. Im Anschluss wird das Halbzeug, also das FK-Rohr mit den gefügten Keels, mittels einer Heizeinrichtung auf circa 60 °C aufgewärmt und verklebt. Die Abbildung 44 zeigt schematisch die Situation beim Fügen der Keels mit und ohne Reduktion des Durchmessers durch Abkühlen des metallischen Elements.

Art	[mm]	Stützfläche	Keel/RT	Keel/-100K
FK- Keeldurchmesser	235			
Übermaß / RT	0,30			
Reduktion / 100K	0,26			
Übermaß beim Fügen	0,04			

Abbildung 44: Berechnung des Presssitzes sowie Situation Fügen [TMa 11]

Das Übermaß verlangt beim Fügen in Bezug auf die Axialität zwischen FK-Rohr und Keel besondere Aufmerksamkeit. Ein Verkanten kann zur Delamination in der FK-Struktur führen. Im späteren Betriebszustand wird sich der Presssitz aufgrund von Umgebungsbedingungen um zusätzliche 0,26mm erhöhen, was in Summe einem Betriebsübermaß von 0,56mm entspricht. Dies ist dadurch zu erklären, dass der Innendurchmesser des FK-Rohres sich thermisch „neutral“ verhält, aber der Außendurchmesser des KEELS sich entsprechend des Wärmeausdehnungskoeffizienten aufweitet. Der Innendurchmesser des Laminats ist in Folge der Überlagerung von der Ausdehnung in Umfangsrichtung ($\alpha_{UL}=8,64 \cdot 10^{-06}/K$) zur Vergrößerung der Wandstärke in radialer Richtung ($\alpha_{RL}=32,5 \cdot 10^{-06}/K$) als neutral anzusehen. Das „Atmen des Presssitzes“, bedingt durch die Temperaturänderung, wurde explizit in Bezug auf das Setzverhalten nicht untersucht.

In der Abbildung 45 sind die beiden Keel-Kontur-Alternativen dargestellt. Während in Abbildung 45a die Kontaktfläche nur zwei Drittel der Fügelänge annimmt, ist sie in Abbildung 45b über die gesamte Länge ausgebildet. Es entspricht dem Stand der Technik, dass bei dünnwandigen FK-Rohren noch zusätzlich ein Außenring (Stützring) über der Fügelänge aufgezogen wird [Tip 09], bei dickwandigen Strukturen kann hierauf verzichtet werden. Die Oberflächenrauigkeit an der Kontaktfläche ist sehr gering, die Werte finden sich im einstelligen Rz-Bereich wieder. Das mittlere Drittel, vgl. Abbildung 45, dient als Kontaktfläche für das Klebemittel. Das benutzte Abreißgewebe (AG) trägt bei einer 50%igen Überlappung 0,9 mm im Durchmesser auf. Zudem ist die erzeugte Oberfläche nicht mehr plan, sondern folgt der ausgeprägten Topografie des Abreißgewebes, was in logischer Folge zu einer Degradation der Übertragungsleistung führt.

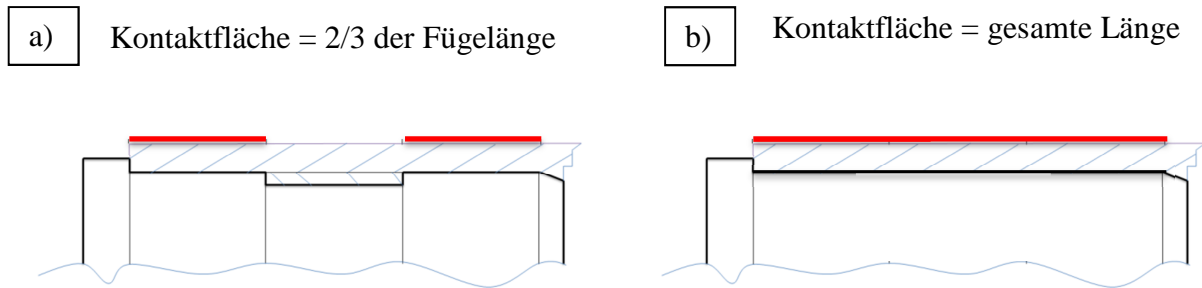


Abbildung 45: Ausführungsform Keel, a) Variante 2 mit Klebetasche, b) Keel Variante 1 nur Presssitz

Der Betriebsprozess zwingt der Walze statisch eine axiale Vorspannkraft (F_a) auf. Abbildung 46 zeigt den theoretischen Kraft-Weg-Verlauf ohne Verwendung von Kühlmittel. Es ist zu bestätigen, dass die Praxisversuche Deckung mit den theoretischen Berechnungen finden. Untersuchungen zu diesem Prozess haben auch gezeigt, dass das Fügen der Keels bei einem Presssitz von höher als 0,3 mm zu Problemen im Planschlag führt.

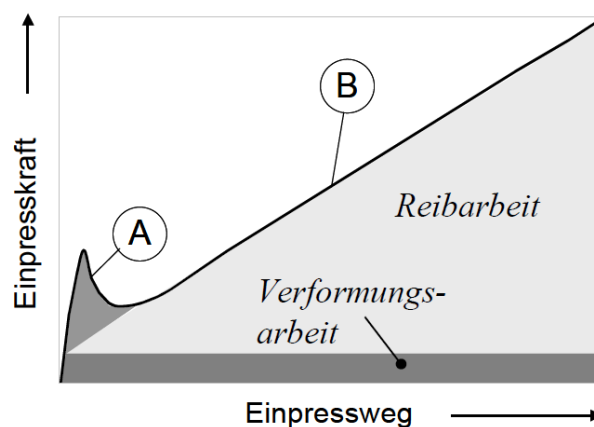


Abbildung 46: Qualitatives Fügedruckdiagramme nach [Fit 05], (Originalbild)

Dadurch hervorgerufen, dass es zu einer messbaren überproportionalen Knickbewegung beim Einfahren des Keels in das FK-Rohr kommt. Aus diesem Grund erweist es sich als notwendig, bei dem Presssitz von 0,5 mm mithilfe von Stickstoff den metallischen Außendurchmesser zu verkleinern, vgl. auch Fischer [Fit 05]. Laut der Berechnung, vgl. Abbildung 44, muss beim Fügen mit reduzierter Temperatur (-100 K) ein Presssitz von 40 µm überwunden werden. Der geringe Presssitz unter Verwendung von einem Kältemittel findet sich auch im Druckdiagramm, vgl. Abbildung 49, wieder. Die erforderliche Fügearbeit unterteilt sich in die reversible verrichtete

elastische Verformungsarbeit und die irreversible Reibarbeit [Fit 05]. Das Aufweiten sowie das Verjüngen des Keels werden über Verformungsarbeit beim Fügevorgang geleistet. Bei der Auslegung des Längspressverbands ist hierbei aber zu beachten, dass der zur Übertragung der Betriebskräfte benötigte Fügedruck über dem kompletten Temperaturintervall hoch genug sein muss [Tip 09], vgl. auch [Fit 05]. Nachteilig hierbei ist aber, dass die gespeicherte Kälte wieder über einen zusätzlichen Prozessschritt entfernt werden muss.

Planschlag als Qualitätsmerkmal

Als hohe technische Hürde im Prozess zeichnete sich der Planschlag ab. Der maximal zulässige Wert als Richtgröße sollte sich im Untersuchungsgegenstand deutlich unter $100\mu\text{m}$ halten. Der Planschlag wird frontseitig am Krafteinleitungselement an einem fixen Radius erfasst. In der Messsituation ist die Walze axial in Lagerelementen eingespannt und besitzt nur noch den rotatorischen Freiheitsgrad. Abbildung 47a bis c erklärt die theoretische Situation im Einbauzustand, gemäß EP08 08701A2. Idealerweise sollte die Paarung der FK-Walzen parallel und rotationssymmetrisch angeordnet sein. Dies würde in Konsequenz bedeuten, dass die Kraftübertragung Keel/Faserverbundschale homogen eingeleitet wird.

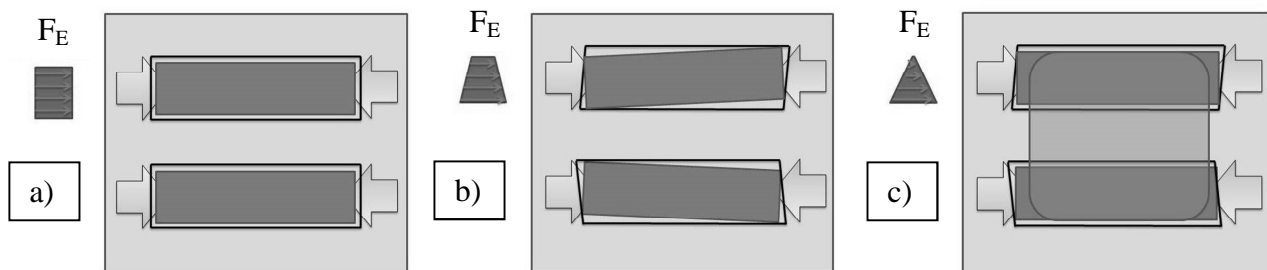


Abbildung 47: Einbausituation [TMa 11], a) idealer Zustand, b) mit Planschlag aber ohne Drahtfeld, c) mit Planschlag und Drahtfeld

In der Realität sind jedoch beim Untersuchungsgegenstand zwei Zustände überlagert, die dazu führen können, dass sich der Krafteintrag vom flächigen im Extremfall zum punktuellen Charakter hin verändert. Zum einen ist es die Situation, dass die Toleranzen der Maschine wie auch der Walze selbst einen Versatz und daher einen Rundlauffehler verursachen. Des Weiteren sorgt das aufgespannte Drahtfeld dafür, dass der rotierende Körper nur bedingt die Möglichkeit hat, ausweichen zu können. Das System ist aufgrund der hohen radialen Belastung axial mit hoher Kraft verspannt. Die gewählte Lagerart ist grundsätzlich dazu geeignet, geringe Pendelbewegungen um die Längsachse auszugleichen. Die hohe Verspannkraft erzeugt aber in der Lagerung eine entsprechend hohe Haftreibung, welche sich auf die Kraftübertragung unsymmetrisch auswirkt. Hieraus resultiert eine hohe Wechselbelastung auf die Press- und Klebefläche durch den Krafteintrag in die Walze während der Rotation. Die Planschläge streuten sehr stark und waren alle außerhalb der Toleranz. Die Arbeitshypothese, dass durch das Anlegen der Keelschulter an das geplante FK-Rohr es zwangsläufig zu einem tolerablen Planschlag hätte kommen müssen, wurde durch die Verwendung der mit Stickstoff abgekühlten metallischen Elemente entkräftet. Da der Keel zur Rohrrinnenseite weniger Wandstärke zur Verfügung hat, verliert dieser dort zuerst an Temperatur, vergrößert dadurch seinen Durchmesser und legt sich zuerst an die FK-Wand an. Infolgedessen wird die Längenänderung des Keels nun nach außen gelenkt und die Metallschulter verliert den Kontakt zur FK-Rohr-Planfläche. Die in Abbildung 48 gezeigte Streuung ist für den Einsatz des Untersuchungsgegenstandes inakzeptabel hoch. Die obere Grenze der Streuung sollte nicht über $70\mu\text{m}$ liegen.

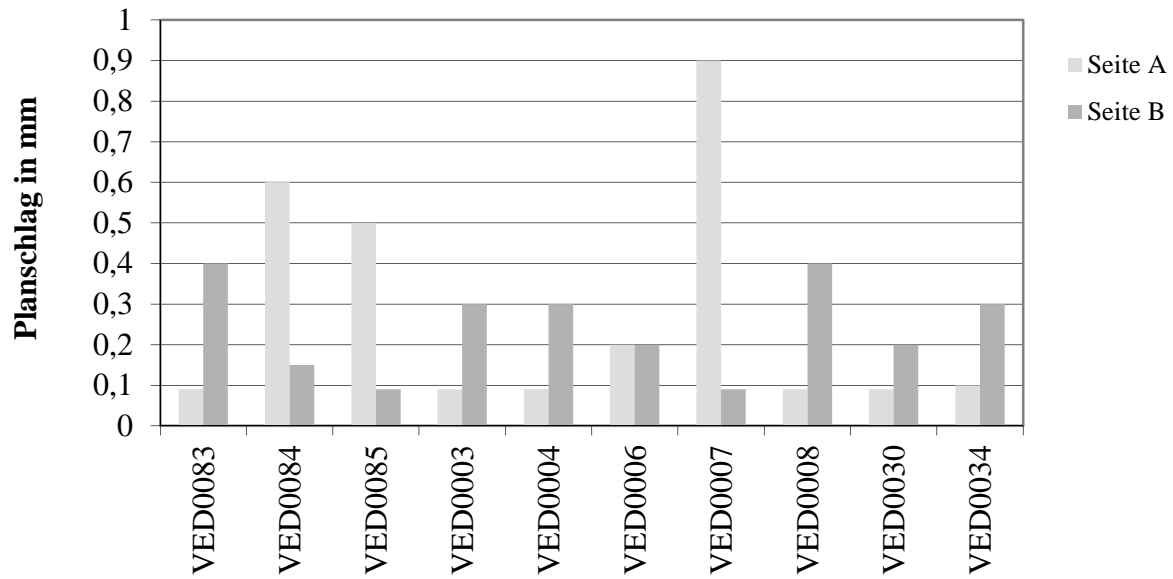


Abbildung 48: Planschläge im konventionellen Fügeprozess, Testreihe [TMa 11]

Fügevorrichtung

Um das Planschlagproblem prozesstechnisch zu lösen, wurde eine Anlage konstruiert, die das FK-Rohr mithilfe einer Prismenauflage horizontal fixiert, vgl. Abbildung 97. Die auf -80 °C abgekühlten Keels sind in einer Haltevorrichtung definiert gefasst. Hierbei wird sichergestellt, dass die Keels planparallel eingedrückt und zudem durch eine Heizung von innen zeitnah erwärmt werden können.

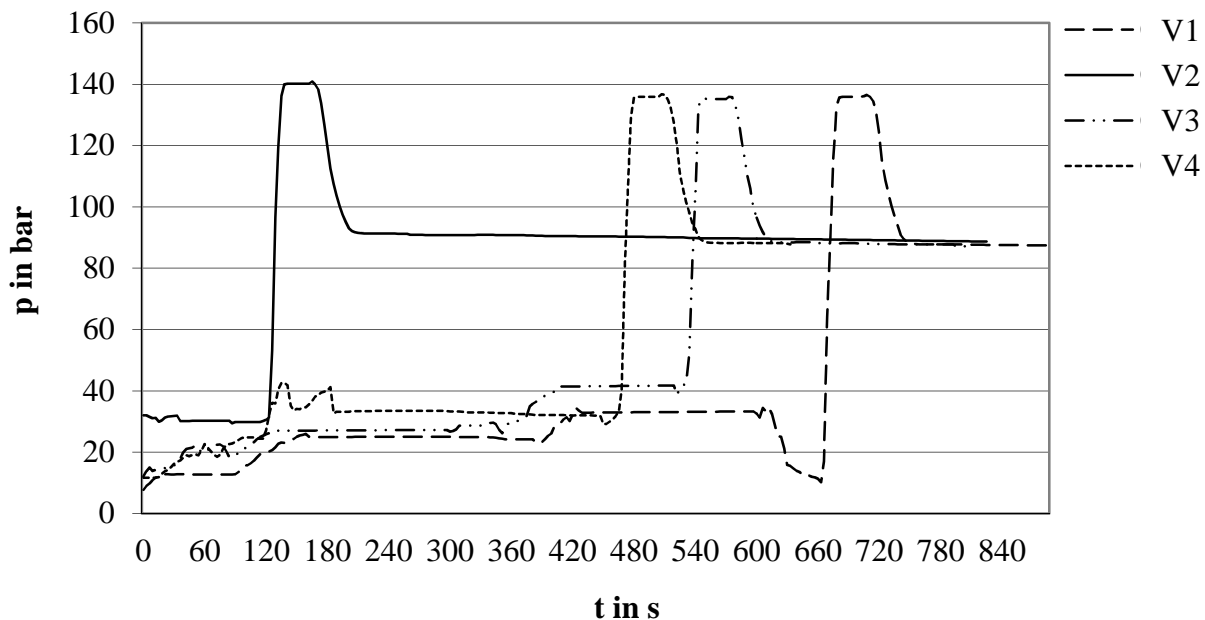


Abbildung 49: Druckdiagramm beim Fügen der gekühlten Keels, Testserie [TMa 11]

Die Anlage ist steuerungstechnisch so programmiert, dass der Fügeprozess mit bis zu 140 bar durchgeführt werden kann. Die Anlage ist im Anhang unter Kapitel 9, Abbildung 97 zu sehen.

Nach dem Anlegen des Keels an die FK-Schulter schaltet die Anlage in den Haltedruck um, der mit 90 bar definiert ist. Der Haltedruck stellt sicher, dass der Keel keine unbeabsichtigte Rückwärtsbewegung während des Erwärmens durchführen kann. Das Kraftdiagramm, vgl. Abbildung 49, dient zugleich als Qualitätsmerkmal. Sollte es zu einem Verkanten des Keels kommen, wird sich dies durch eine Kraftspitze aufzeigen. Zeitgleich wird die in den Fügeköpfen integrierte Heizung aktiviert und zehn Minuten gehalten. Nach dieser Zeit hat der Keel, frontseitig gemessen, eine Temperatur im einstelligen Plusbereich.

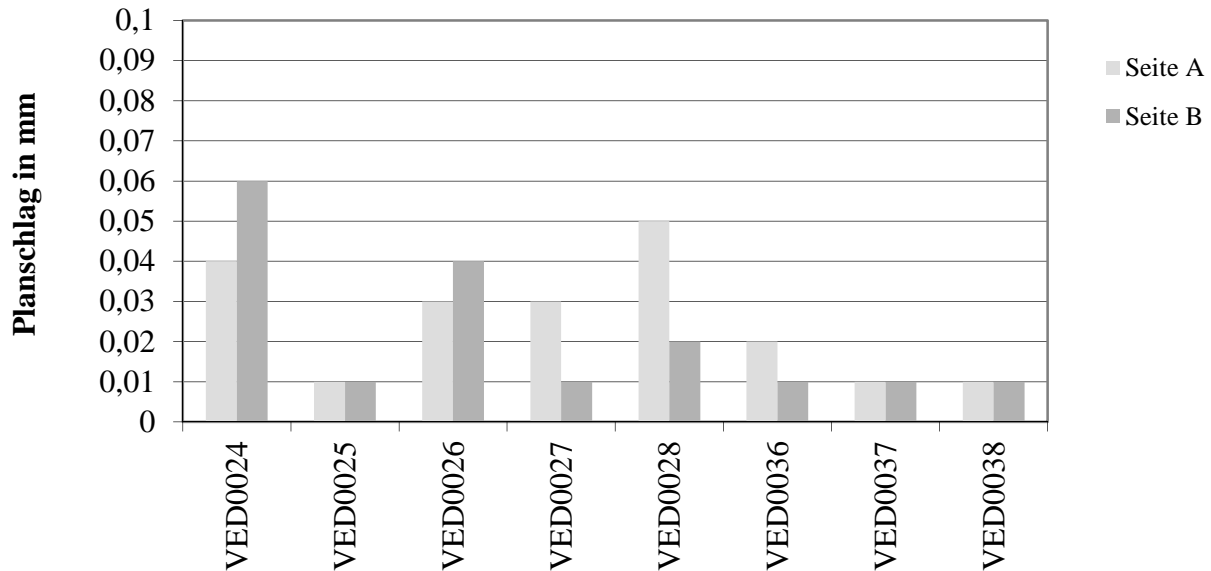


Abbildung 50: Planschläge im optimierten Prozess, Testserie [TMa 11]

Es konnte durch dieses Verfahren erreicht werden, dass die Planschläge um den Faktor 10 verbessert wurden. Die Abbildung 50 zeigt die Ergebnisse der Planschläge nach der Optimierung des Prozesses.

Kleberauswahl und Applikation

Unter Kleben versteht man das flächige Verbinden gleicher oder verschiedenartiger Werkstoffe unter Verwendung einer meist artfremden Substanz, die an den Oberflächen der zu verbindenden Teile haftet und die Kräfte von einem Fügepartner auf den anderen überträgt. Kleben zählt zu den stoffschlüssigen und im klassischen Sinne nicht lösbaren Verbindungstechniken [SIZ 12]. Die Kraftübertragung beim Untersuchungsgegenstand wird über zwei Komponenten eingeleitet. Erstens ist es der Formschluss, der circa 2/3 der Fügelänge beträgt, zweitens ist es die Klebeverbindung, die das restliche Drittel an Fläche definiert. Je höher die Beanspruchung der Klebeverbindung ist, desto gründlicher muss die Vorbehandlung stattfinden. Neben der einmaligen Definition der Klebeparameter (Klebstoffwahl, Oberflächenrauigkeit, etc.) ist höchster Wert auf das Säubern und Entfetten zu legen. Grundsätzliche Regeln zur Gestaltung von Klebeverbindungen sehen vor, dass Scherbeanspruchungen zu bevorzugen und Schälbeanspruchungen unbedingt zu vermeiden sind. Bei Zugbeanspruchungen sind große Kontaktflächen vorzusehen sowie Randspannungsspitzen zu entschärfen. Gleichmäßige Klebspaltweiten sind von Vorteil [USi 06]. Der Vorteil einer Klebeverbindung ist die relativ gleichmäßige Spannungsverteilung, Klebeverbindungen sind schwingungsdämpfend und lassen auch größere Fügetoleranzen zu. Als Nachteile ist die geringe Temperaturfestigkeit, die Gefahr der Unterwanderung der Klebeschicht sowie der Mangel an zerstörungsfreien Prüfverfahren zu nennen. Die Haftgrundvorbereitung

erfordert große Sorgfalt, lange Aushärtezeiten stören den Fertigungsablauf, Fügeeinrichtungen, wie Heizpressen, sind nur bei großen Stückzahlen wirtschaftlich. Folgende Klebstoffe, vgl. Tabelle 14, wurden unter Zuhilfenahme von Probekörpern untersucht.

Alle Probekörper wurden mit einem definierten Klebespalt in zylindrischer Form ausgestattet. Die Prüfung erfolgte bei Raumtemperatur. Die Klebtaschentiefe wurde in Anlehnung an eine bereits erstellte Untersuchung, vgl. [TMa 08], ausgeführt. Die Oberflächenrauigkeit liegt idealerweise im zweistelligen Rz-Bereich. Die Kleberkombination K3 zeigte sich aufgrund der Verarbeitbarkeit als auch der stabilen Scherfestigkeit (Lap shear strength) über dem gewählten Temperaturbereich als am besten geeignet.

Tabelle 14: Ergebnisse der Untersuchung [TMa 08]

Bezeichnung	Zugkraft	Spannung
	[N]	[N/mm ²]
K1 / 22 °C	141.865	30,10
K2 / 22 °C	87.634	18,60
K3 / 22 °C	74.926	15,90
K4 / 22 °C	71.188	15,11
K5 / 22 °C	64.640	13,72

Infolge der gewählten Abminderungen wurde zur Berechnung der Dauerfestigkeit ein Faktor von 0,313 angelegt. Damit sollte der Kleber kontinuierlich 250 kN übertragen können. Trotzdem ist der Verklebevorgang sehr sensibel. Werden die Arbeitsschritte zur Vorbereitung des Klebeintrages nicht stringent durchgeführt, kommt es unmittelbar zu Abweichungen in der Leistungsfähigkeit der Verbindung.

Zur Berechnung der Dauerfestigkeit wurden folgende Degressionen, siehe Tabelle 15, gewählt:

Tabelle 15: Gewählte Abminderungsfaktoren an der Klebefläche

Einfluss	Reduktion	Faktor
	[%]	
Abmindern Schichtdickenfehler Kleber	20	0,8
Abmindern Alterung (Degradation Presssitz)	30	0,7
Abmindern Feuchteintrag	0	1
Abmindern Wärme (60 °C)	20	0,8
Abmindern dynamisch durch Rotation	30	0,7
Summe		0,313

Großen Wert ist auf das Präparieren der Oberflächen der Klebeverbindung zu legen, diese sind sehr gründlich zu reinigen. Besondere Vorsicht ist bei der Verwendung von wässrigen Lösungen geboten, diese können in die Faserverbundstruktur eindringen und sind vor dem Fügen mitunter wieder aufwendig trocken zu legen. Es empfiehlt sich daher Lösungsmittel zu verwenden. Idealerweise wäre ein Verzicht auf die Verklebung für den Prozess die optimale Lösung.

5.2.1.5 Sektion 5 Coating

Funktion der Beschichtung

Beim Untersuchungsgegenstand hat die PUR-Beschichtung folgende Aufgabe:

- Versiegeln der FK-Oberfläche
- Führen der Schneiddrähte.

Der Verschleißmechanismus setzt sich aus mehreren Faktoren unterschiedlicher Gewichtung zusammen, vgl. hierzu Abbildung 98 im Anhang unter Kapitel 9.

Anforderung an die FK-Oberfläche

Die Anforderung an die FK-Oberfläche ist mit zwei Kriterien verknüpft. Der FKV-Deckverbund als solches muss in einer hohen Ablagequalität hergestellt sein, das Vermeiden von Vakuolen, siehe Abbildung 51b, hat höchste Priorität. Der Faservolumengehalt in den tragenden Schichten soll zwischen 49 und 54 % betragen. Die Decklagen müssen optimal geschlossen sein, hier ist ein Faserwinkel von 30°, besser 45° empfehlenswert. Der Faservolumengehalt in der Decklage sollte idealerweise 52 % nicht überschreiten.

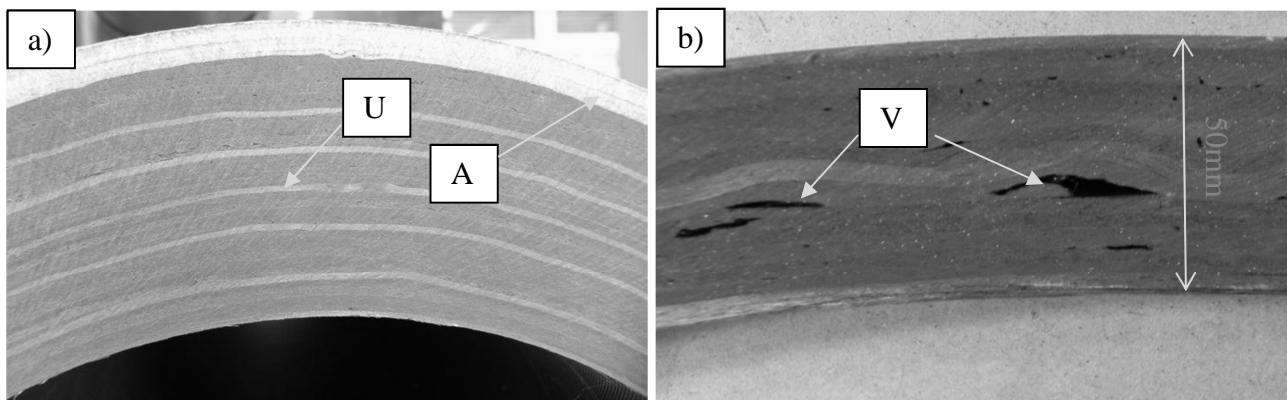


Abbildung 51: Laminataufbau [TMA 11], a) 50 mm ausreichende gute Wickelstruktur, b) 15 mm stark vakuolenhaltige Wickelstruktur

Abbildung 51a zeigt einen ausreichend guten Laminataufbau mit applizierter GTS-Schicht in der Untersuchungsserie. Gut zu erkennen ist die Verteilung der 90°-Schichten (U) (Umfangslagen). Der GTS-Layer (A) dient zugleich als Barrierschicht zum CFK-Unterbau. Abbildung 51b spiegelt eine fehlerbehaftete Struktur wider. Diese ist nicht akzeptabel für einen Beschichtungsprozess, da die Gefahr der Ausgasung hoch und der Prozess nicht beherrschbar ist.

Es hat sich aber gezeigt, dass mangelhaft applizierte CFK-Oberflächen, dadurch gekennzeichnet, dass eine kritische Anhäufung von Fehlstellen vorliegt, durch eine sogenannte ATS-Oberfläche verschlossen werden können. Hierbei handelt es sich um ein Glasgewebe welches unmittelbar nach dem Wickelprozess, somit im nassen Zustand, auf die letzte Lage appliziert wird, siehe Abbildung 52a.

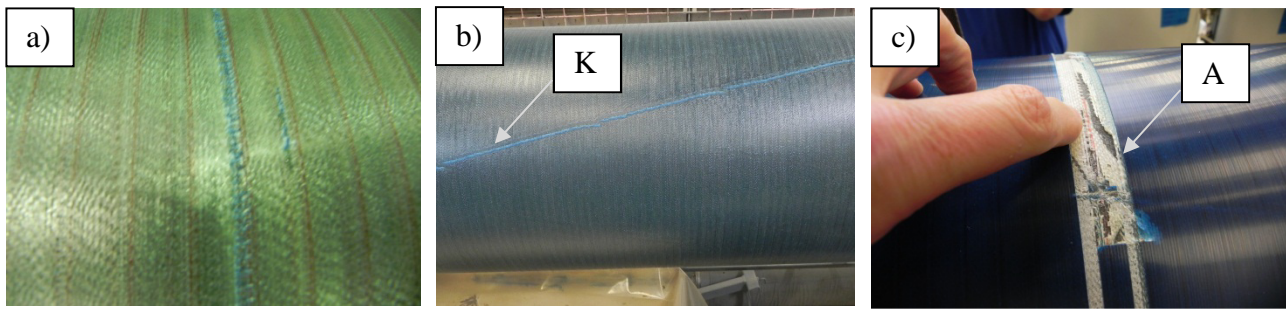


Abbildung 52: GTS- Oberfläche [TMa 11], a) und b) mit Knitterfehler, c) mit Imprägnierfehler

Bei der Applikation kam es jedoch immer zu sogenannten „Knitterfalten“ (**K**), siehe Abbildung 52b, welche sich parallel zum zuletzt aufgetragenen Wickelwinkel abbildeten.

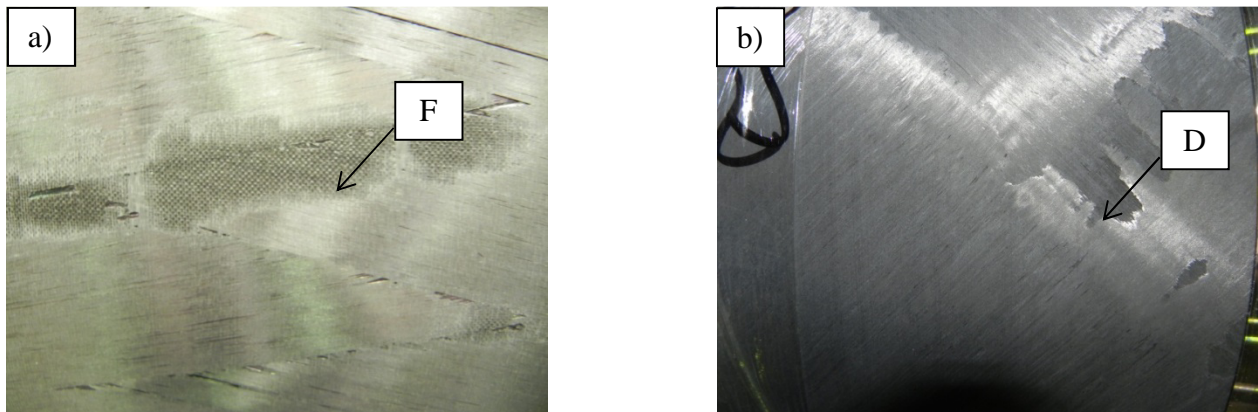


Abbildung 53: CFK-Oberfläche [TMa 11], a) Fehlerbehaftet, b) Ideal für den Beschichtungsprozess

In der anschließenden Drehbearbeitung wurde diese topografische Störung angeschnitten, was nicht selten zu einem Stopp im Fertigungsablauf führte. Trotz größter Bemühungen war es nicht möglich, dieses Merkmal komplett zu eliminieren. Ein weiteres, besonders in der Anfangsphase gern aufgetretenes Ereignis, sind Imprägnierungsprobleme in der GTS-Schicht. Diese führten nach dem Beschichten zu Ablösungen (**A**), Abbildung 52c, sowohl zur CFK-Oberfläche als auch zur PUR-Schicht. Darüber hinaus forderte die GTS-Schicht höhere Kosten in Material als auch in der Fertigung selbst. Um dieses Problem zu umgehen, wurde mit einer Oberfläche experimentiert, welche, in CFK aufgebracht, gleichzeitig als Grundlage für die PUR-Beschichtung dienen kann. Abbildung 53a zeigt eine stark fehlerbehaftete Oberfläche (**F**), welche in verschiedenen Ausprägungen zur Ausgasung aus der CFK-Schicht sowie zu Fließstörungen während der PUR-Applikation führte. Typische Delaminationen sind in Abbildung 53b mit (**D**) gekennzeichnet zu sehen. Unter Delaminationen sind Zwischenfaserbrüche zu verstehen, welche zur Entstehung des Fehlers wenig Energie benötigen [Pua 95]. Der Einfluss des Maschinenbedieners stellte sich auch als eine nicht zu unterschätzende Größe heraus. Die Abbildung 54a und Abbildung 54b zeigen abgelöste CFK-Schichten, der blaue Hintergrund ist das PUR. Das Drehen der CFK-Oberfläche fordert eine Bearbeitungszeit von 14,2 Minuten.

Der Beschichtungsprozess ist gekennzeichnet durch drei Heizprozesse, welche die Oberfläche thermisch belasten, der erste beim Einbrennen des Haftvermittlers, der zweite durch die Reaktionswärme des applizierten PUR-Materials und der dritte beim Tempern des aufgetragenen PUR-Materials. Als prozessstabile Lösung erwies sich eine 30°, besser noch 45°-Deckschicht, welche im Filament-Winding-Prozess mit verringerter Tapegegeschwindigkeit, idealerweise 20m/min, gefahren wird.

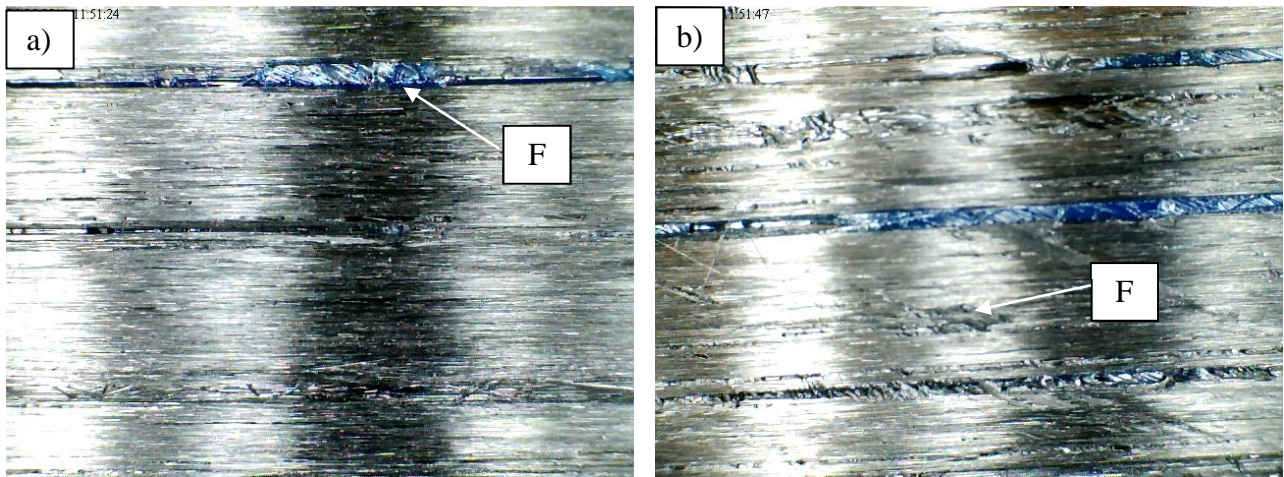


Abbildung 54: a) Fehler in der 12°-Lage, b) Fehler als trockener Bereiche [TMa 11]

Abbildung 55a zeigt das ideale Bruchbild, welches mithilfe eines scharfkantigen Werkzeuges an einer 45°-Oberfläche erzeugt wurde. Die interlaminaire Haftung ist derart hoch, dass sich das PUR von der Grenzfläche nicht oder nur teilweise ablösen lässt. Hingegen zeigt Abbildung 55b ein ungewolltes Delaminieren der Decklage, rein durch bearbeitungsbedingt aufgebrachte Scherkräfte.

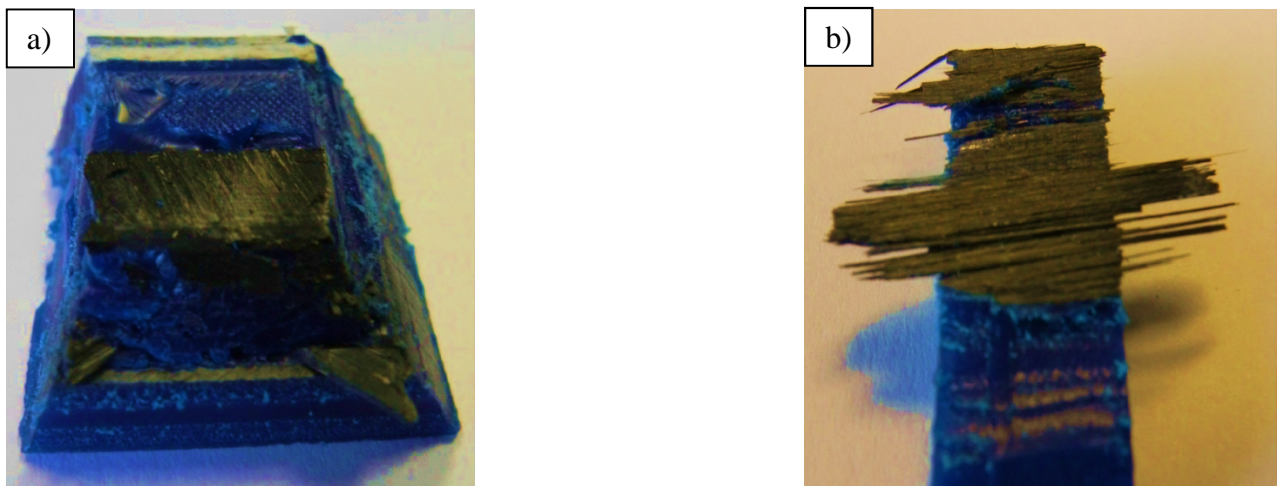


Abbildung 55: Bruchbild an der Grenzfläche FK zu PUR [TMa 11], a) Optimales bei einer 45°-Oberfläche, b) Suboptimales bei einer 12°-Oberfläche

Überarbeiten der FK-Oberfläche

Als Grundlage für die Beschichtung dient eine zylindrisch vorgearbeitete, wenn möglich fehlerfreie Oberfläche. Der Drehprozess wird mithilfe einer PKD-Schneidplatte durchgeführt, vgl. Abbildung 56a.

Genannte Bearbeitungsparameter wurden sowohl bei der GTS-Oberfläche als auch bei der 45°-CFK-Oberfläche angewandt. Nachteilig bei diesem Verfahren ist aber die starke Staubbildung (**D**), vgl. Abbildung 56a, welche zwangsweise zu einer Belastung für Mensch und Maschine sorgt. Sehr positive Eigenschaften haben sogenannte Supportschleifer, siehe Abbildung 56b, welche ohne Zugabe von Kühlmittel ausreichende gute Oberflächen herstellen. Untersuchungen mit positivem Ergebnis wurden mit einer Korund-Schleifscheibe mit der Geometrie 500/100/127 erreicht.

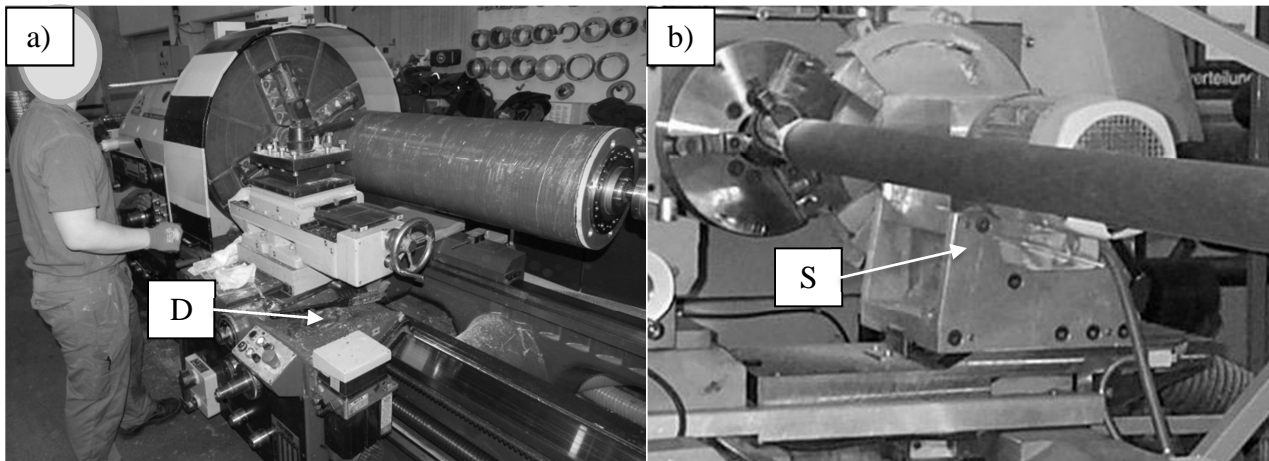


Abbildung 56: Oberflächenbearbeitung [TMa 11], a) Drehmaschine mit DTS , b) Schleifspindel mit Halter im Einsatz

Rändeln der Seitenscheiben

Das Vorbereiten der Seitenscheiben für den Beschichtungsprozess ist ein wesentlicher Bestandteil der Arbeit. Grund hierfür ist die Forderung, dass die Stirnscheibe maximale Haftung zum PUR hat und somit ein Unterwandern des Slurrys [IPc 13] verhindert. Eine Benetzung vom Slurry zur FK-Oberfläche führt zwangsweise zu einem Ausschuss, da es in Konsequenz die Haftung dauerhaft verhindert. Aus diesem Grund wird die Stirnscheibe unmittelbar vor dem Beschichten mit einem Standardwerkzeug gerändelt. Der Bearbeitungsprozess erfolgt trocken, Schmiermittel oder andere Fluide sind nicht zugelassen.

Abbildung 57 zeigt das Rändelbild in unterschiedlichen Vergrößerungen. Die Gesamtdauer für Ein- und Ausspannen, Drehen, Rändeln und Reinigung beträgt 35 Minuten pro Bauteil und Mann. Als ausgesprochen prozesssensibel in Bezug auf die Haftung des PUR zeigt sich das Verhalten des Aluminiums bezüglich der Lagerhaltung. Abhängig von den Lagerbedingungen (Feuchte und Temperatur) ist das bearbeitete Material nur kurzzeitig aktiv genug, um eine ausreichend gute Haftung zur PUR-Beschichtung zu gewährleisten. Der Werkstoff bildet bei Lagerung an der Luft eine dünne, sich rasch entwickelnde Aluminiumoxidschicht, die es vor weiterer Korrosion schützt, aber somit auch die Haftung mit PUR verhindert.

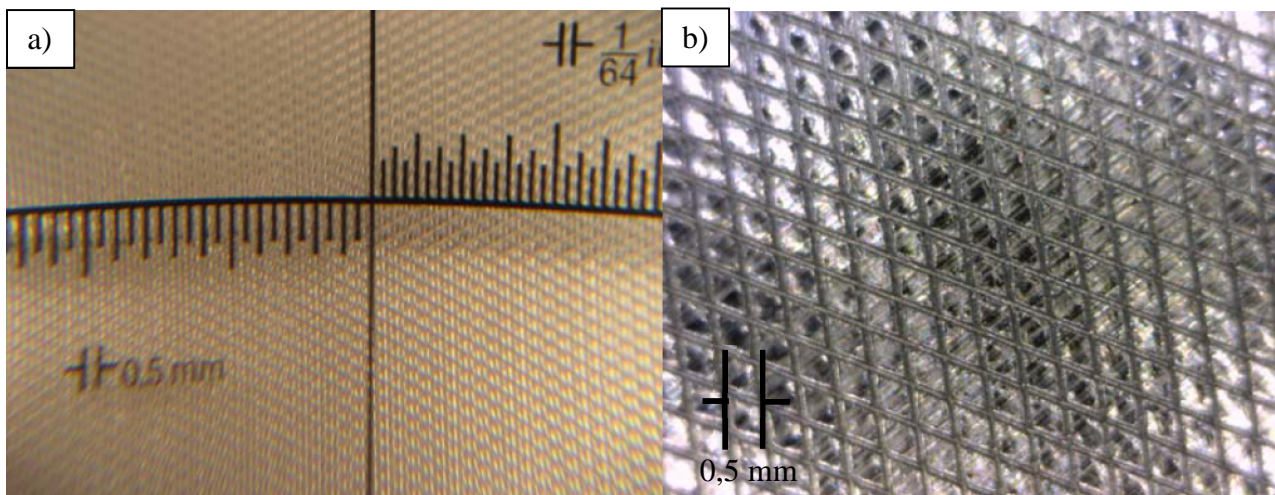


Abbildung 57: Rändelbild Seitenscheibe [TMa 11], a) mit Maßangabe, b) in Nahaufnahme

Diese sogenannte Selbstpassivierung verhindert in hohem Maß die Vorgabe einer optimalen Randhaftung. Um hier einen Maßstab festsetzen zu können, wurde folgender Versuch unternommen. 36 Walzen sind am Tag eins gerändelt und unterschiedlich lang gelagert worden.

Die Lagerstätte war ein geschlossener Raum, zwangsbelüftet (Umluft gemischt mit Außenluft), nicht klimatisiert, aber frostsicher. Die Versuche wurden im Sommer unternommen, während der Testphase kam es aufgrund Wetterschwankungen zu normalen Feuchteänderungen im Lagerort. Untersucht wurden drei Merkmale die Haftung betreffend:

- Absolute Weiterreißfestigkeit des PUR am Rand
- Loslösung an der Grenzfläche, die optisch sichtbar war, im Bereich um die 0,4 mm
- Keine Loslösung, jedoch das Erkennen der gerändelten Struktur, was die erste Phase vor dem Ablösen darstellt.

Die PUR-Haftung bei einer Halbzeug-Lagerzeit größer 20 Tage war ausnahmslos ungenügend, begründet dadurch, dass das PUR ohne nennenswerten Kraftaufwand sich löste.

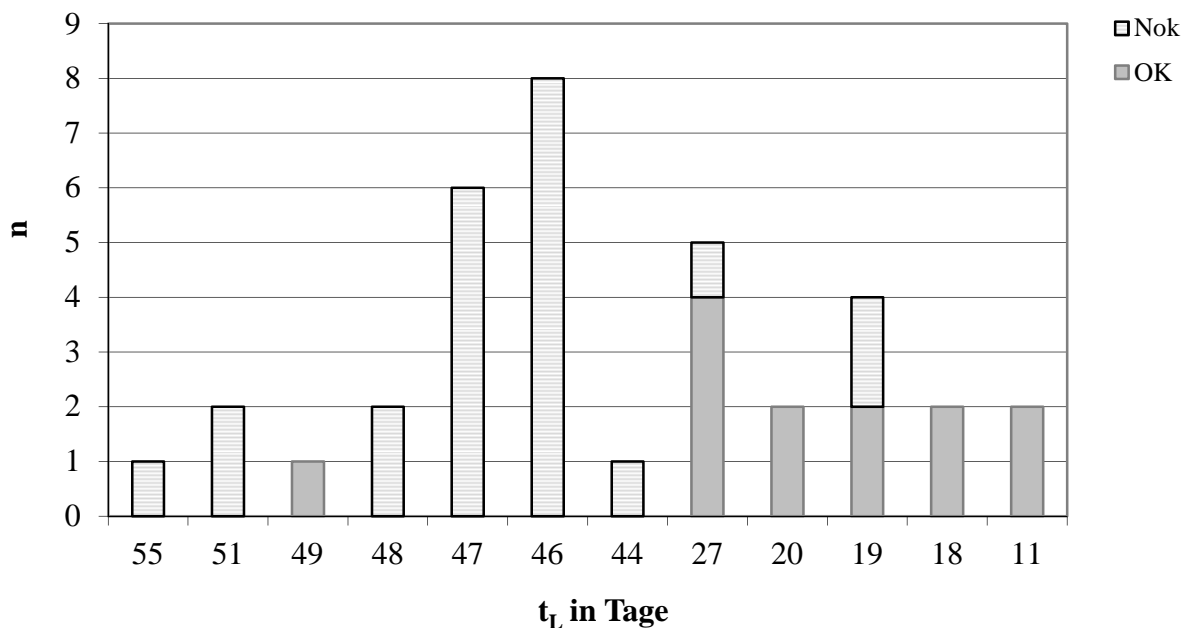


Abbildung 58: Beurteilung der Randhaftung in Abhängigkeit der Lagerzeit [TMa 11]

Abbildung 58 zeigt die Erkenntnis in Bezug auf die Loslösung. Alle mit „Nok“ bezeichneten Prüflinge hatten entweder einfache oder mehrfache Ablösungen zu verzeichnen. Aus den Erkenntnissen der Untersuchung heraus kann gesagt werden, dass für den beschriebenen Prozess idealerweise nur eine prozessbezogene Pausenzeit kleiner einem Tag ideal ist, längstens jedoch vier Tage tragbar sind. (Die Zeit bezieht sich vom Abschluss der Stirnseitenbehandlung bis zur Applikation des Haftvermittlers). Angemerkt werden kann, dass das Aluminium nicht zwingend gerändelt werden muss. Verfahren, wie das Sandstrahlen, eignen sich ebenfalls in hohem Maß, wurden jedoch aufgrund der Komplexität der Integration in den fließenden Prozess nicht im Detail untersucht.

PUR-Beschichtung

O. BAYER legte 1930 den Grundstein für die Entwicklung und Verarbeitung von Polyurethanen (PUR). Dieser Werkstoff wird in unterschiedlichsten Bereichen eingesetzt. Die Breite reicht von Beschichtungen bis zu Klebstoffen, von Schuhsohlen bis hin zu Schaumstoffdämmungen. Selten hat eine neue Produktklasse die Landschaft der Kunststoffe und Elastomere so schnell und nachhaltig verändert, wie 1952 die Polyurethane [Zef 91]. PUR gibt es grundsätzlich von trans-

parent bis transluzent (lichtdurchlässig). Oft ist es daher notwendig, das Material einzufärben. Die Gefahr beim Einfärben ist jedoch, dass es zur Änderung der mechanischen Eigenschaften kommen kann, beim Untersuchungsgegenstand im Speziellen betrifft es die Berillbarkeit. Im Prinzip sieht die Vorbereitung zum Gießen, unabhängig ob ein Metall- oder Composite-Grundkörper vorliegt, wie im Weiteren aufgeführt aus. Die Oberfläche wird gereinigt, dies kann von der Verwendung von Strahlgut bis hin zu Lösungsmittel variieren. Anschließend wird das Haftmittel appliziert. In speziellen Fällen ist das Haftmittel thermisch zu behandeln. Im Anschluss folgt der eigentliche Guss. Abhängig von der Reaktivität sowie des applizierten Volumens können erhebliche Wärmeentwicklungen stattfinden, diese gilt es zu beherrschen. Dieser Wärmeschrumpf baut nennenswerte Spannungen auf die Composite-Grenzfläche auf. Prinzipiell stehen zwei Verfahren zur Verfügung, um den Untersuchungsgegenstand zu beschichten. Das ältere Verfahren, auch als Vertikalguss bezeichnet, beschreibt sich dadurch, dass das Werkstück in eine Form eingeschlossen wird, entweder stehend oder liegend, dann meist von unten nach oben mit dem PUR geflutet wird. Die Reaktionszeit muss so gewählt werden, dass genug Zeit zum Befüllen der Form zur Verfügung steht. Die Wärmeabgabe wie auch die spanende Nachbehandlung gestaltet sich aufgrund des geringeren Übermaßes meist einfacher. Beim Rotationsguss sind meist schnellere sogenannte Hochreaktivsysteme in der Anwendung. Die Methode als solche ist aus Anlagensicht günstig, von der Applikation jedoch sensibel. Umfangsgeschwindigkeit des Körpers, Form und Menge des Gießstrahls wie auch Viskosität müssen genau abgestimmt werden. Wird beim Standguss der Körper gänzlich umschlossen, muss beim Rotationsgussverfahren für eine Vorlauf- und Nachlaufstrecke gesorgt werden. Bei der Montage solcher Elemente sollte zum einen auf gute An- und Demontagefähigkeit geachtet werden, zum anderen auf spaltenfreies Anliegen zum eigentlichen Vergusskörper, um Ausgasungen und somit Fehlstellen im späteren Bezug stirnseitig zu verhindern.

Haftvermittlerauftrag

Dem Haftvermittler, auch Primer genannt, wird beim Untersuchungsgegenstand eine mehrschichtige Aufgabe zuteil. Zum einen, das ist auch seine ursprüngliche Funktion, soll er die Adhäsion zwischen der Compositematrix (CFK-Oberfläche) und dem Polyurethan verbessern. Der Haftvermittler bildet Molekularbrücken an den Grenzflächen zwischen anorganischen Zuschlagstoffen und der organischen Polymermatrix [BBO 07] aus. Es liegt beim Untersuchungsgegenstand eine überlagerte Belastung vor. Durch den Drahtzug in Kombination mit dem anliegenden Antriebsmoment der Walze im Betrieb wird eine Scherspannung in Umfangsrichtung erzeugt. Zusätzlich wird durch den Temperschwund eine Scherspannung in axialer Richtung überlagert, was bei durchgeführten Untersuchungen zu einer lokalen (ca. 20 mm im Durchmesser) bis hin zu einer sektionalen Ablösung (großflächig, meist um den ganzen Umfang) geführt hat.

Zum anderen soll die Porosität der geschliffenen Compositeoberfläche geschlossen werden, um Fehlstellen, Luftblasen oder „Vulkane“ zu verhindern. Als „Vulkane“ bezeichnen die Fachleute eine sich zur Beschichtungsoberfläche konzentrisch vergrößernde Luftblase, welche bis zum CFK-Grund durchgängig ist. Luftblasen können, sofern klein, noch in Grenzen akzeptiert werden, „Vulkane“ führen den Bezug in den Ausschuss, der Nachweis kann über Ultraschall geführt werden [DPV 97]. Die Abbildung 99b im Kapitel 9 zeigt das manuelle Applizieren des Haftvermittlers auf der bereits geschliffenen Oberfläche mit GTS-Schicht zur Vorbereitung für das Beschichten sowie in Abbildung 99a im Speziellen, wie die Oberfläche mithilfe von MEK von Staub- und Schmutzresten befreit wird.

Nach jedem Überfahren der Oberfläche wird das Baumwolltuch auf eine saubere Seite gewendet, bis dieses optisch sich nicht mehr verschmutzt. Der Auftrag des Haftvermittlers, vgl. [Lis 07], erfolgt mit einem japanischen Naturhaarpinsel. Eine Abluftzeit von mehreren Minuten im

Anschluss ist prozessbedingt notwendig. Dieser Prozess wird zweimal wiederholt, bei einer Abluftzeit von unter einer Stunde bei Raumbedingungen. Das aufgetragene Gemisch wird beim konventionellen Prozess im Anschluss circa mehrere Stunden bei über 100 °C getempert.

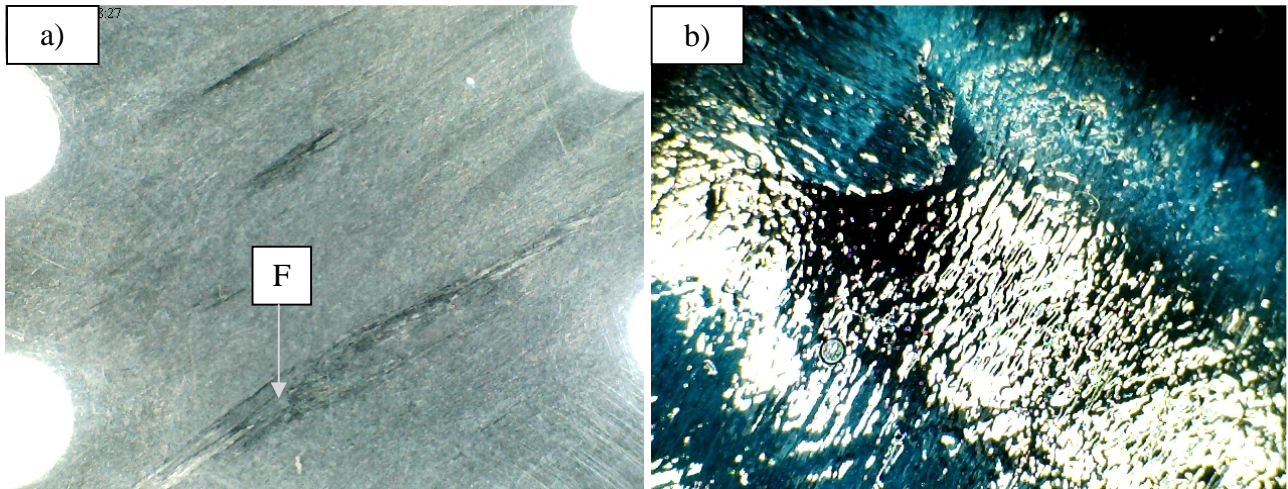


Abbildung 59: FK-Oberfläche [TMa 11], a) vor dem Haftvermittlerauftrag mit Fehlstelle F, b) nach dem Haftvermittlerauftrag

Die Abbildung 59a zeigt die FK-Oberfläche vor dem Haftvermittlerauftrag. Zu erkennen sind herstellungsbedingte Fehlstellen (**F**), welche sich im untersuchten Prozess nicht verhindern lassen. In Abbildung 59b wird die Oberfläche nach dem Auftragen des Haftvermittlers gezeigt. Die Fehlstellen wurden mit einer Art „Schutzschicht“ umschlossen und verhindern das Ausgasen der FK-Grenzschicht. Die GTS-Schicht hat naturbedingt eine höhere Barrierewirkung als die FK-Oberfläche. Es konnte aber gezeigt werden, dass die 45°-FK-Oberfläche in Verbindung mit dem genannten Haftvermittlerauftrag ein blasenfreies Produkt erzeugt.

Beschichtungsprozess

Der Beschichtungsprozess ist höchst sensibel, kleinste Abweichungen führen unmittelbar zu negativen Resultaten in der Qualität des Auftrages. Die Markierungen, vgl. Abbildung 60, **IR1** zu **IR2**, respektive **IR3** zu **IR4** geben den Temperaturgradient auf der Oberfläche wieder. **IR5** zeigt den gesamten Verlauf über der Länge an. In den zahlreichen Vorversuchen erschienen folgende Fehlerquellen als besonders kritisch:

- Microbubbles
- Luftblasen an der Grenzfläche FKV zu PUR
- Große Luftblasen, die teilweise die gesamte PUR-Wandstärke durchdringen
- Ablösungen des Bezuges an der Grenzfläche.

Beim Härter ist eine prozessbedingte Entgasungszeit vorgeschrieben. Nach Ablauf dieser Zeit sind augenscheinlich keine Bläschen im Material mehr sichtbar sein. Die Abbildung 60a zeigt die Temperaturentwicklung im Gießprozess bei fast vollständiger Applikation, Abbildung 60b bei Fertigstellung. In Vorversuchen führte dies teilweise zu Delaminationen der FK-Oberfläche. Im Anschluss wird die beschichtete Walze 24 Stunden bei 120 °C getempert.

Es ist in Abbildung 100a, im Anhang Kapitel 9, zu sehen, wie das Material auf eine GTS-Schicht appliziert wird, als auch die Knitterfalte (**KF**) auf der Oberfläche der GTS-Schicht.

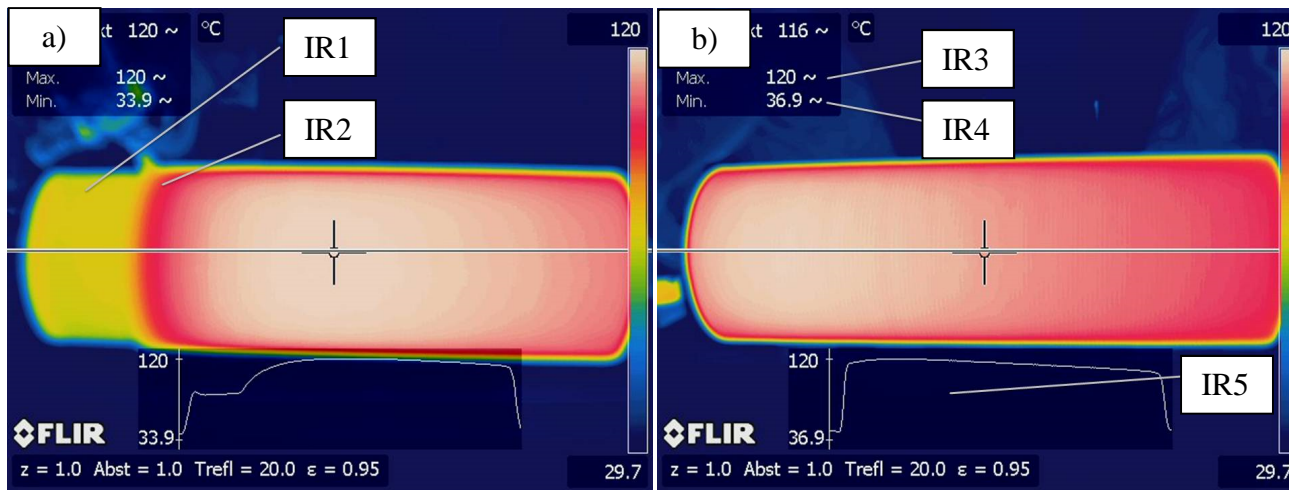


Abbildung 60: Infrarot-Aufnahme [TMa 11], a) IR-Kurve Beschichtung in Prozess, b) IR-Beschichtung final

Aufgrund der geringen Topfzeit der PUR-Masse treten im Reaktionsprozess kurzzeitige Temperaturen von bis zu 120 °C auf, vgl. Abbildung 60a und 60b, welche zu erheblichen Schrumpfspannungen im Material führen. Es ergeben sich folgende Materialeigenschaften der PUR-Oberfläche, vgl. Tabelle 16.

Tabelle 16: Mechanische Daten des PUR 103

	Härte	Reißdehnung	Reißfestigkeit	Weiterreißfestigkeit
Prüfvorschrift	DIN 53505	DIN 53504	DIN 53504	DIN 53515
	[ShA]	[%]	[Mpa]	[kN/m]
PUR 103	96,5	266	43,3	46,5

5.2.1.6 Sektion 6 Endbearbeitung

Polyurethan-Oberfläche überarbeiten und Seitenscheibe überdrehen

Die Endbearbeitung stellt hohe Anforderungen an die Bearbeitungswerkzeuge, insbesondere beim Bearbeiten von elastischen Bezügen, welche zum Erzeugen von Endlosspänen neigen. Diese Späne (SP) fließen mit bis zu 300 m/min über das Werkzeug ab, vgl. Abbildung 61.

Die Herausforderung hierbei ist, dass der Span ungehindert über das Werkzeug abgleiten kann, da es sonst unmittelbar zu einem Umschlingen des Werkstückes kommt, was letztendlich zu einer Prozessunterbrechung führt. Hieraus folgt eine reine Eingriffszeit des Werkzeuges von circa 3,54 Minuten. Die Bearbeitungszeit pro Seite ohne Rüsten lag bei circa 46 Sekunden, pro Walze somit bei 92 Sekunden

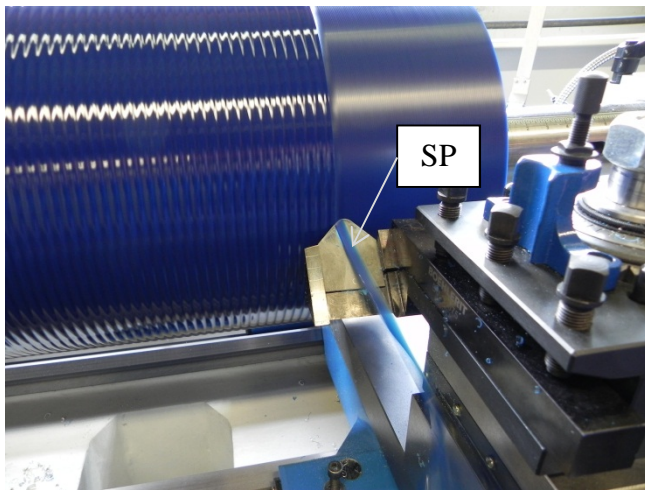


Abbildung 61: Vordrehen der PUR-Oberfläche [TMa 11]

5.2.2 Auswuchten

Allgemein

Der Untersuchungsgegenstand rotiert im Betrieb weit unter der ersten Biegeeigenfrequenz, welche bei knapp unter 50.000rpt erwartet wird. Daher ist der Rotor als starr zu bewerten. Laut Definition [Lia 92] liegt dann ein starrer Rotor vor, wenn dieser sich unter der Einwirkung von Kräften und/oder Momenten nicht verformt. Natürlich ist dies ein rein theoretischer Ansatz, da die verwendeten Materialien auch immer elastische Eigenschaften aufweisen. Auswuchten ist ein notwendiger Teil des allgemeinen Produktionsprozesses, meist mit dem Ziel, Schwingungen zu reduzieren und die Lebensdauer zu erhöhen. Unerwünschte Schwingungen führen zu vorzeitigem Verschleiß der Lagerung, weiterhin kann es zu Materialermüdung sowie in der Folge zum Versagen funktionswichtiger Elemente kommen. Beim betriebsmäßigen Wuchten werden die Lagerschwingungen gemessen und beruhigt [GNP 01]. In erster Größenordnung wird die Unwucht im Untersuchungsgegenstand durch Fertigungsfehler, wie Lunker im FK-Mantel, sowie Herstellungsungenauigkeiten, insbesondere durch auftretende Exzentrizität verursacht. Um einheitliche Maßstäbe bei Maschinenschwingungen zu erhalten, wurden 1966 mithilfe der VDI 2060 starre Rotoren klassifiziert [Sch 00]. Die physikalischen Grundlagen zum Auswuchten von Rotoren sowie die erzielten Qualitätsstufen, vgl. Abbildung 108, im Anhang Kapitel 9.

Berechnung der Gütestufe

Der Untersuchungsgegenstand ist entsprechend der Gruppierung in der Gütestufe $Q=2,5$ (Anmerkung, in vielen Quellen auch als „G“ bezeichnet) eingeordnet, vgl. [Sch 00]. Die Stufe $Q=2,5$ bedeutet, dass sich die zulässige Bahngeschwindigkeit des Schwerpunktes mit 2,5mm/s bewegt. Laut Definitionsblatt, siehe Tabelle 3, beträgt die berechnete Masse des Rotors 172kg, die maximale Drehzahl wurde mit 1.200rpt festgelegt. Nach der DIN ISO 1940 resultiert hieraus eine zulässige Restunwucht e_{zul} von 20 μ m (oder 20g*mm/kg). Mit e_{zul} wird die Verlagerung des Schwerpunktes von der Drehachse bezeichnet, vgl. Formel (16).

$$e_{zul} = \frac{v_{zul}}{\omega} = \frac{2,5 \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot 1200} \left[\frac{mm \cdot s}{s} \right] = 0,0199 \text{ mm oder } 20 \mu\text{m (gerundet)} \quad (16)$$

Hieraus, vgl. Formel (17), ergibt sich die zulässige Unwucht U_{zul} .

$$U_{zul} = e_{zul} * m = 20 * 172,8 \left[\frac{g*mm*kg}{kg} \right] = 3.456 \text{ g*mm} \quad (17)$$

Das Ergebnis definiert, dass beim Auswuchten in zwei Ebenen die zulässige Toleranz U bei $3.456/2 \text{ g*mm}$ somit 1.728 g*mm/Ebene liegt. In Folge des Auswuchtradius beim Untersuchungsgegenstand, der mit 120 mm festgelegt ist, entspricht dies einer maximal zulässigen Masse von $14,4 \text{ g}$.

Praktische Umsetzung

Der praktische Teil folgt der Theorie. Jedoch weist der Untersuchungsgegenstand eine Innenlagerung auf, welche bei Verwendung von Standard-Auswuchtanlagen unter Verwendung von Hilfszapfen (A3), Abbildung 62a, angepasst werden muss. Mithilfe einer Spannachse (A2) werden nun die beiden Zapfen (A3) axial verbunden und fixiert. Die Spannachse ist beidseitig mit einem Gewinde versehen, welches durch eine Schraubenmutter (A1) gespannt wird. Die Abbildung 62b zeigt den Rotor in der Wuchtsituation. Es stellte sich heraus, dass es leicht möglich ist, solche Hilfsvorrichtungen während der Montage zu verspannen.

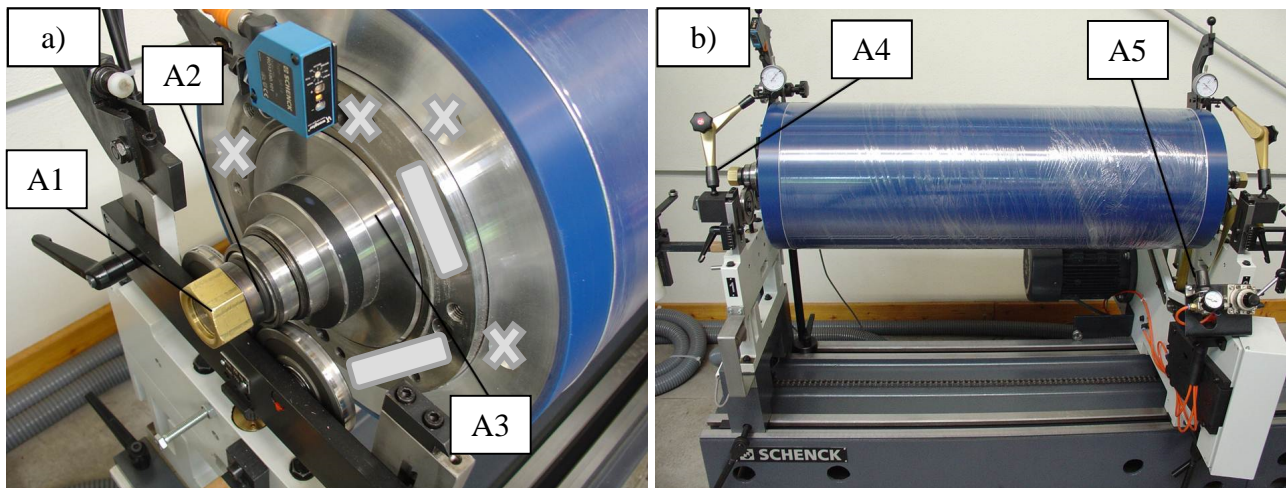


Abbildung 62: Situation Auswuchtanlage [Win 11], a) Axiale Verspannung, b) Auswuchten in Einspannsituation

Infolgedessen überlagert sich zur Unwucht die undefinierte Einspannsituation, somit wird nicht explizit der Untersuchungsgegenstand, sondern die augenblickliche Situation gewuchtet. Untersuchungen zeigten, dass mithilfe einer Messuhr (A4), vgl. Abbildung 62a, der Fehler im Vorfeld einfach zu erkennen ist. Die verwendete Auswuchtmaschine der Firma SCHENCK RoTec GmbH verfügt über einen Bandantrieb, welcher sich pneumatisch (A5) spannen lässt, vgl. im Anhang unter Kapitel 9, Abbildung 108 die Situation jeweils vor und nach dem Auswuchten und in einer Aufspannung gemessen. Die Kompensationsmassen werden in der Regel frontseitig im Keel eingebracht, welche dann durch eine Kunststoffschraube zu sichern sind.

5.3 Qualität

5.3.1 Total Quality Management

Qualität ist im heutigen Wettbewerb der entscheidende Faktor bei allen Bemühungen um die Gunst des Kunden [FDa 08]. Der Begriff Qualität darf nicht mit dem Begriff Exzellenz oder

Spitzenleistung in Zusammenhang gebracht werden. Die Amerikaner assoziieren mit dem Begriff Qualität „fitness for use“, also die Gebrauchsfähigkeit eines Produktes [Tiw 02], [HSC 00]. Vielmehr ist es die Fähigkeit, definierte Kundenforderungen punktgenau zu erfüllen. Damit ist die Definition „Qualität beschreibt die Erfüllung der Erwartungen des Kunden“ als richtig zu bezeichnen. Trotzdem sind Forderungen nach hoher Qualität mehrschichtig. Der Kunde will hiermit sichergehen, dass sein Produkt gebrauchstauglich als auch zuverlässig ist. Die Gesellschaft fordert gesetzliche Auflagen, angefangen von der Sicherheit für das Leben und die Gesundheit bis hin zur Schonung von Umwelt und Ressourcen. Der Produzent benötigt für seine Existenz eine wirtschaftliche Herstellung, Risikominimierung als auch eine ausreichende Marktakzeptanz [Tiw 02]. In der Summe der heutigen Industriewelt im Bereich Faserverbund (Luftfahrt ausgenommen) ist die Denkhaltung beschränkt auf Qualitätskontrolle und -sicherung. Das ist aber nicht ausreichend, um den Werkstoff breit zu industrialisieren. Qualität ist als Führungsstrategie zu verstehen, es umfasst das gesamte Unternehmen, nicht nur die Produktion. Erst, wenn der Qualitätsgedanke ganzheitlich integrativ (total) über das Unternehmen gespannt wird, kann den besonderen Ansprüchen vom Faserverbund Rechnung getragen werden.

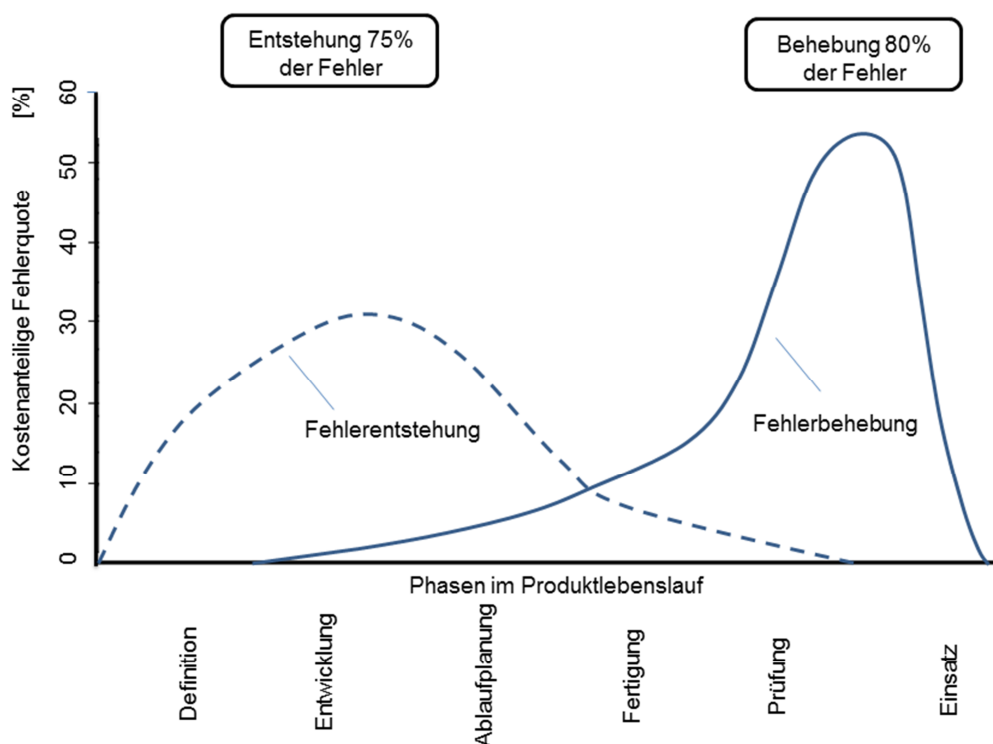


Abbildung 63: Fehlersituation nach JAHN [Jah 88], (Originalbild)

Die Abbildung 63 zeigt den Zusammenhang zwischen Fehlerentstehung und Fehlerbehebung auf. Der überwiegende Teil von Fehlern wird in der Entwicklungsphase initiiert [Jah 88]. Diese ziehen sich dann bis in den Fertigungsbereich und kommen erst dort zum Tragen. Die Anzahl an Fehlerursachen sinkt in der Produktionsphase stark ab. Das bedeutet, je später ein Fehler entdeckt wird, desto kostenintensiver wird seine Behebung. Nach JAHN entstehen circa 75 % der Fehler in der Entwicklungsphase, 80 % von diesen verursachten Fehlern werden dann zwangsweise in der Produktion beseitigt. Die Conclusio hieraus ist, dass Qualität nicht nur hergestellt, sondern explizit geplant werden muss. Abbildung 64 zeigt, dass Änderungen, die in der Konstruktionsphase notwendig werden, sehr gering im Wert sind [Pft 93]. Werden Fehler von der Entwicklung bis zur Produktion durchgereicht, entsteht ein Mehrfaches an Kosten, um diese zu beheben. Nach PFEIFER sind es drei Stufen, welche die Kosten eines nicht entdeckten Fehlers jeweils verzehnfachen. Besonders im Bereich von Faserverbundbauteilen ist die Qualitätssicherung ein

zentraler Punkt. Bei wenigen anderen Produkten ist das Verhältnis von Material- zu den Herstellkosten so stark ausgeprägt. Ein Fehler im Design oder in der Herstellung wirkt sich sofort merklich negativ auf die Gewinn- und Verlustrechnung aus.

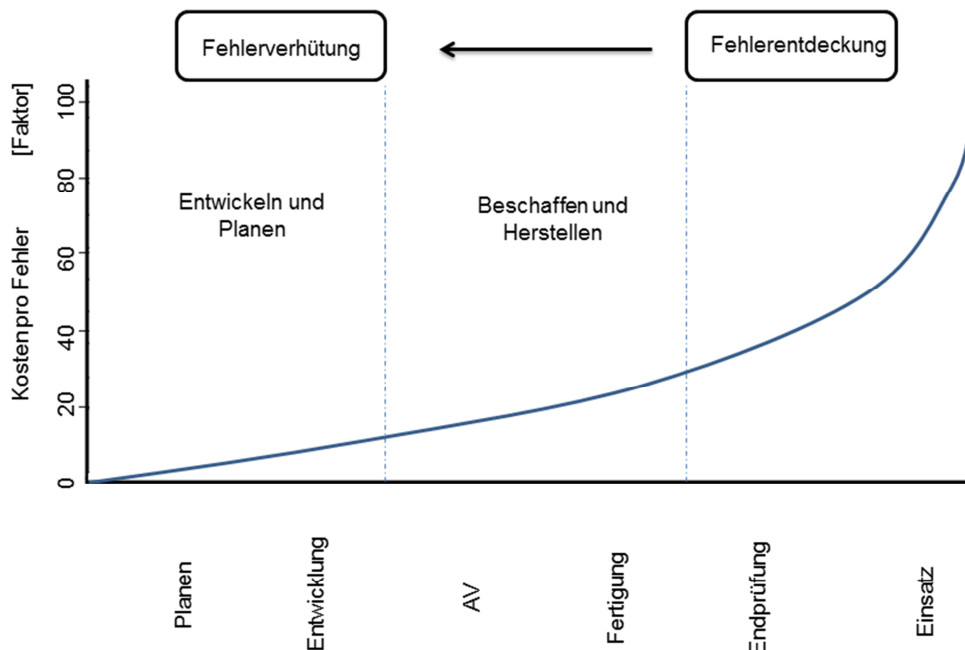


Abbildung 64: Zehnerregel der Fehlerkosten nach Pfeifer [Pft 93], (Originalbild)

Die Situation wird von DEMING treffend aufgezeigt, vgl. Abbildung 110. Um dem steigenden Qualitätsbewusstsein gerecht zu werden, muss das Rad ständig nach vorn bewegt werden, das Zurückrollen ist durch Standards zu verhindern. Der Weg hierzu ist das wiederholte systematische Anwenden des PCTA-Zyklus. Qualitätssicherung kostet Geld. In der Praxis ist es leider noch so, dass QS als unliebsame Begleiterscheinung moderner Produktionen angesehen wird. Um aber im internationalen Wettbewerb bestehen zu können, ist der Stellenwert real nicht zu unterschätzen. Wird der Qualitätssicherung nicht die notwendige Aufmerksamkeit zuteil, schlagen sich Abweichungen bis zum Kunden durch. Ganz zu schweigen von Schäden, die dem Verbraucher womöglich durch ein fehlerhaftes Produkt entstehen können. Schneller als gedacht ist der Hersteller im Bereich der Produkthaftung unterwegs. Bereits [BHS 08] nannten in ihrer Untersuchung „Serientaugliche Bearbeitung und Handhabung moderner faserverstärkter Hochleistungswerkstoffe“ die aufwendige Qualitätssicherung als Schwäche in der SWOT-Analyse.

Qualitätsfluss

Abbildung 65 zeigt die Qualitätsstufen im konventionellen Prozess auf. Da der FKV-Materialeinsatz knapp 20% vom Verkaufspreis beträgt, die Fertigungskosten sind hierbei noch nicht veranschlagt, wird klar, wie wichtig eine funktionelle Qualitätssicherung ist. Mithilfe von statischen Verfahren, zum Beispiel Qualitätsabweichungsberichte, wird online im Herstellungsbetrieb die Qualität kontrolliert, möglichst zeitnah ausgewertet und zielgerichtet gegengesteuert. Wie in Abbildung 65 zu sehen, wird der komplette Herstellungsprozess, angefangen vom Werkzeug bis hin zur Endkontrolle, abgefragt. Die Routine im Prozess hat gezeigt, dass ein unkontrolliert beschädigtes Werkzeug, als Beispiel mit Durchhang versehen, erst in der Prozessstufe „**Restunwucht**“ auffällig wird. In einem solchen Fall sind mitunter alle bis dahin abgearbeiteten Arbeitsstufen infrage zu stellen. Die Übergabe in den nächsten

Bearbeitungsschritt erfolgt mithilfe einer Ampelregelung, die bei Rot („Stopp“) die nächste Bearbeitungsstufe nicht erlaubt. Dem Erfassen der Chargennummern, insbesondere der Matrix- und Fasersysteme, gilt eine besondere Aufmerksamkeit. Im Reklamationsfall, verursacht durch die Rohstoffe, muss zeitnah eine Abgrenzung der betroffenen Bauteile möglich sein. Ist dies nicht umsetzbar, kann es im Extremfall zu einer kompletten Rückrufaktion führen. Es hat sich mithilfe eines QS-Leitsystems als sinnvoll erwiesen, dass der komplette Lebenszyklus des Produktes in einer Datenbank abgespeichert wird.

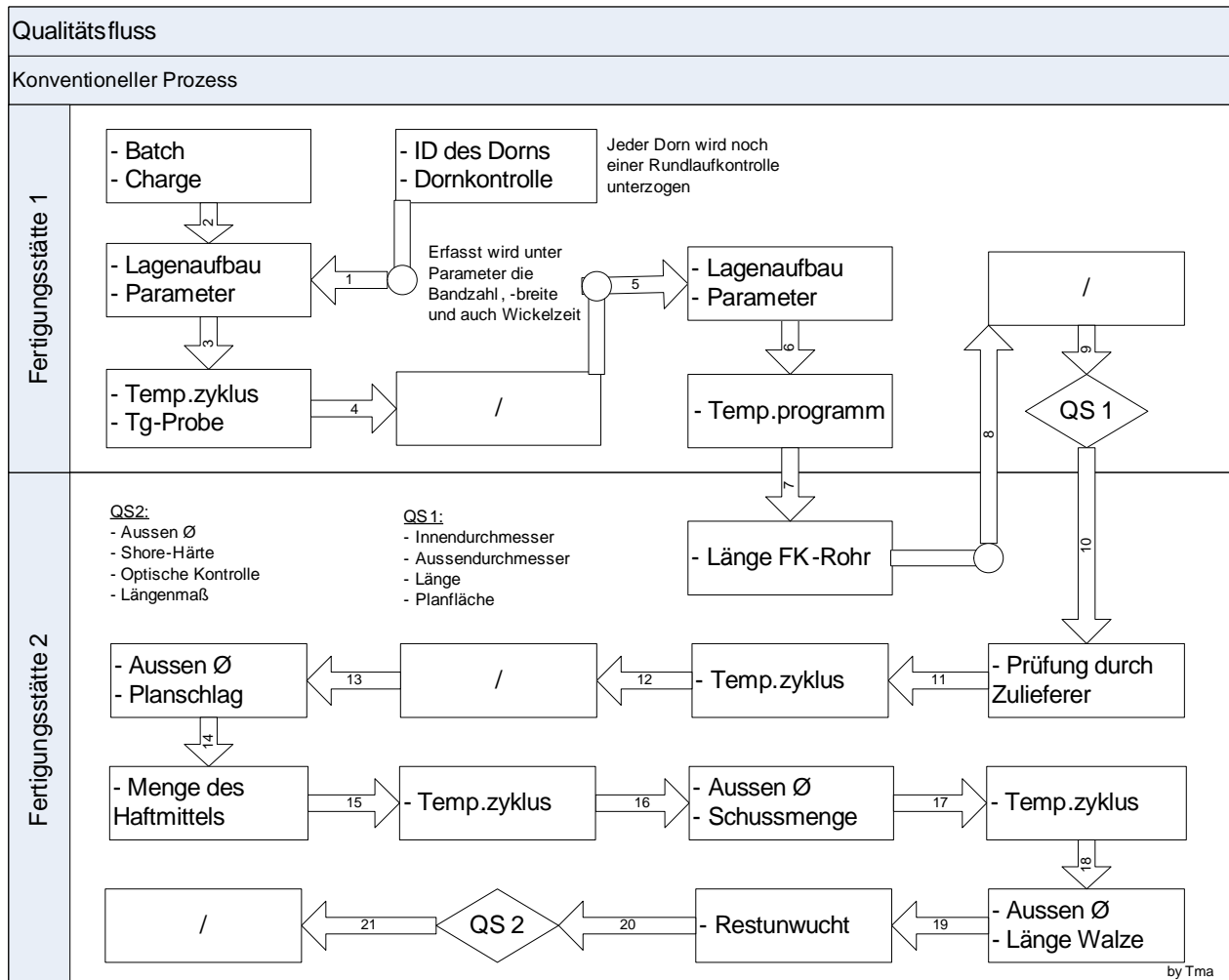


Abbildung 65: QS-Fluss im konventionellen Prozess

5.3.2 Prozessintegrierte Qualitätssicherungsverfahren

„Wo immer man Veränderungen oder Innovationen vorantreiben möchte, muss man auf Widerstand gefasst sein“, formulierte SIMON [Sih 04]. Besonders Faserverbundprodukte benötigen ein Umdenken im Umgang mit Qualitätskontrollen. Notwendige Bedingung ist aber für die dauerhafte Etablierung neuer Produkte die volle Beherrschung der Qualitätskette. Die Verschwendung in Industrieunternehmen ist einer der größten Kostentreiber [JMRS 06]. Mit gängigen Optimierungswerkzeugen, zum Beispiel Six-Sigma, können bis zu 30% der Kosten eingespart werden. Daher führt dies unmittelbar zu einer Erhöhung des Umsatzes [JMRS 06]. Um Qualität zu beurteilen, muss diese erst einmal über Toleranzen beschrieben und dann messbar gemacht werden. Die zeitnahe Analyse ist entscheidend, um Prozesse am Laufen zu halten und Totzeiten zu verhindern. Im Folgenden werden drei der untersuchten Verfahren vorgestellt, um Verschwendung und Liegezeiten zu begegnen.

RFID-Technologie

Die Bedeutung des Akronym „RFID“ basiert auf dem englischen Begriff „radio-frequency identification“. Ins Deutsche lässt sich dies übersetzen mit „Identifizierung mithilfe elektromagnetischer Wellen“. Einfach beschrieben besteht ein solches System aus einem Transponder, der in der Regel fest mit dem Körper verbunden ist, und einem Auslesegerät, das den Code oder allgemein die hinterlegte Information ausliest. Die RFID-Technologie ist in der Lage, den heute noch häufig verwendeten Barcode zu ersetzen. Die Kopplung wird entweder durch magnetische Wechselfelder mit geringer Reichweite oder durch hochfrequente Radiowellen erzeugt. Bei den einfachen Systemen, wie auch für die Versuche verwendet, verfügt der Transponder nicht über eigene Energiequellen, was das im Werkstoff integrierte System gegenüber dem Empfänger teilweise abschirmt. Der Vorteil aber ist die kleine Bauform und vor allem der geringe Preis.

Bei den Versuchen mit den RFID-Chips kam es speziell zu folgenden Schwierigkeiten: Der Urformprozess, das Filament-Winding, benötigt eine eindeutige Zuordnung der Lamine für die spätere Verwendung. Hierzu ist eine einfache Produktnummer (ID) ausreichend. Prädestiniert wäre die Integration eines RFID in das nasse Laminat. Zwei Gründe sprechen aber dagegen: a) die Tatsache, dass der CFK-Verbund elektrisch leitende Eigenschaften aufweist und somit ein Auslesen erschwert oder gar verhindert, und b) das Auffinden des eingelegten Chips ist, aufgrund der geringen Reichweite, nur sehr schwer möglich, vgl. Abbildung 101 im Anhang Kapitel 9. Es zeigte sich somit, dass ein manuelles Beschriften des Laminats nach der Applikation des Abreißgewebes auf der nassen Oberfläche als eine einfache und wirkungsvolle Methode akzeptiert werden kann, um das Halbzeug für den späteren Prozess eindeutig zu identifizieren. Folglich ist es aber so, dass nach dem Entfernen des Abreißgewebes eine erneute Identifizierung mittels Identifizierungsmedium (RFID, Barcode) zu erfolgen hat. Hierzu wurde folgende Möglichkeit geschaffen. Mittels der verwendeten QS-Software ist es aus der Auftragsmaske jederzeit möglich, erneut einen produktbezogenen Barcode auszudrucken, um das Bauteil immer eindeutig gekennzeichnet zu halten.

Barcode

Für die Identifikation wurden selbstklebende Barcodelabel verwendet. Dieses System bietet den Vorteil, dass über gängige Informationstechnik einfach Daten zur Herstellung abgelegt als auch gleichzeitig abgerufen werden können. Und dies auch vor Ort, zum Beispiel in der Produktionsstätte selbst. Die Handhabung ist denkbar einfach. Trotzdem kam es während der Untersuchung zu folgender Fehlerart. Es wurde versäumt, das Bauteil nach einem erfolgten Arbeitsschritt mit einem Barcode zu beschriften. Durch entsprechende Schulungsmaßnahmen und kurzzeitige Konzentration der Qualitätssicherung auf dieses Thema konnte der Prozess stabilisiert werden. Der Herstellungsvorgang wird durch einen alphanumerischen Code überwacht, der sogenannten VED-Nummer. Diese Nummer wird beim Erfassen des Auftrags durch das QS-Leitsystem erzeugt und unter anderem als Barcode wiedergegeben. Das System verfügt über die Möglichkeit, die Auslegungsdaten des Auftrags in technischer Sicht über die Angebotsnummer zu verfolgen. Die Aufgabe des untersuchten QS-Leitsystems ist es, alle Prozessschritte zu überwachen und Abweichungen sofort transparent zu machen. Die Handhabung ist sehr einfach, erfordert jedoch die ständige Aktion der Prozessteilnehmer, die mit dem Barcodescanner die Aktion anmelden, abmelden und in diesem Zusammenhang Abweichungen sofort ins QS-Leitsystem transportieren. Die verwendete Software ist so konfiguriert, dass die Abweichungen über ein sogenanntes Ticketsystem unmittelbar an die zuständige Abteilung weitergeleitet werden. Der Versuch, die Rohstoffe über ein rein manuell gesteuertes System auftragsbezogen zu erfassen, scheiterte. Die Zuordnung konnte nicht vollumfänglich hergestellt werden. Ein Nachtrag war nur

innerhalb weniger Tage möglich, danach in der Summe nicht mehr reproduzierbar. Aus diesem Grund wurden die verwendeten Hauptrohstoffe, Faser und Matrixsysteme über die Laufkarte dem Produkt eindeutig zugeordnet. Es wurde darauf verzichtet, auf dem Barcode Prozessinformationen zu hinterlegen, da die Daten aufgrund der hohen Prozessgeschwindigkeit nahezu nie aktuell gehalten werden können.

5.4 Der konventionelle Prozess

Die Produktion findet in zwei separaten Fertigungsstätten (Sektionen) statt. Die Laminatherstellung bis zum Entformungsprozess ist in der Fertigungsstätte (Bereich) 1 platziert, das Beschichten bis zum Versand in der Fertigungsstätte (Bereich) 2, vgl. das Hallenlayout in Abbildung 103 und Abbildung 104. Diese sind örtlich, jedoch mindestens durch eine Wand voneinander getrennt. Als der zeitbestimmende Prozess wird die Laminatherstellung definiert. Dadurch ist es notwendig, mit zwei Filament-Winding-Maschinen zu arbeiten, welche je mit einer Doppelspindel ausgestattet sind. Um den als Basis für die Untersuchung definierten Gesamtbedarf von 8.000 Stück Walzen pro Jahr decken zu können, muss die Anlage pro Woche circa 26 Lamine herstellen können. Grundlage für die gewählte Stückzahl ist die Zusammensetzung des europäischen Producer Market, vgl. Abbildung 7. Dies bedeutet, dass bei linearer Betrachtungsweise pro Woche 154 DTS die Werkshalle verlassen müssen. Die Anlage ist damit 52 Wochen pro Jahr dreischichtig ausgelastet, Samstag und Sonntag sind produktionsfrei geplant und können für Wartungsaufgaben benutzt werden. Die Lamine werden nach dem Prozessende „Filament-Winding“ an den Ofen übergeben. Dieser hat die Möglichkeit, gleichzeitig mehrere Lamine inklusive des Stahlkerns (Werkzeug) zu fassen. Beide Filament-Winding-Anlagen beschicken mit ihren in Summe vier Spindeln prozesssynchron je einen Ofen, sodass dieser möglichst zeitnah in die Temperphase überführt werden kann.

5.4.1 Untersuchte Fertigungsart

Die Fertigungsart wird charakterisiert durch die Häufigkeit der Leistungswiederholung im Produktionsprozess [GKA 07]. Der hier untersuchte konventionelle Fertigungsfluss ist durch die Merkmale der Massenfertigung geprägt, insofern, als dass höchste Wiederholhäufigkeit vorliegt. Der Fertigungsablauf ist über lange Zeiten als konstant anzusehen. Die Fertigungsmittel sind entsprechend der Bedürfnisse sehr spezialisiert. Dies bedeutet aber auch eine hohe Empfindlichkeit der Fertigungsmittel gegenüber Störungen. Der Organisationstyp wird als Fließfertigung beschrieben. Der Prozess ist als eine Zusammenfassung verschiedener Betriebsmittel zu Funktionsgruppen, welche durch ein Transportsystem miteinander gekoppelt sind, zu sehen. Die verbindende Transportart wird über Flurförderer realisiert, die durch Menschen, auch zum Teil teilautomatisiert, bewegt werden. Diese Art der Fertigung erlaubt ein hohes Rationalisierungspotenzial und hohe Ausnutzung der vorhandenen Betriebsmittel im Fertigungsprozess. Die Anforderung an die Qualifizierung der Mitarbeiter ist eher gering. Als Nachteil ist hierbei zu nennen, dass eine Umstellung auf andere Produkte nicht oder nur schwer möglich ist. Eine Kundenanforderung auf Produktänderungen ist entsprechend träge und zeitlich aufwendig. Aus Kostensicht führt diese maximale Ausnutzung der Betriebsmittel zu einer Fixkostendegression und folglich zu einer Reduktion der Herstellkosten. Der Bestand an Halbfertigerzeugnissen soll sich auf die im Prozess befindlichen Baugruppen beschränken. Die final produzierten und als in Ordnung befundenen Endprodukte werden in geringen Losgrößen zeitnah abtransportiert. Betriebs- und Hilfsstoffe können aufgrund der genauen Taktung in Minimalmengen bevorratet werden, sinnvollerweise wird der Bedarf wochenweise aufgefrischt. Das Potenzial an Verschwendung ist gering, begründet dadurch, dass niedrige Bestände, kurze Durchlaufzeiten und ein geringer Steuerungsaufwand vorliegen, vgl. die Beschreibung der

Maschinen sowie das Hallenlayout im Anhang unter dem Kapitel 9, Tabelle 25 sowie Abbildung 103 und Abbildung 104.

5.4.2 Materialfluss

Abbildung 66 zeigt den Material- und Halbzeugfluss im konventionellen Prozess bis hin zum auslieferfähigen Endprodukt. Das Schema ist unterteilt in **Fertigungsstätte 1** und **2**.

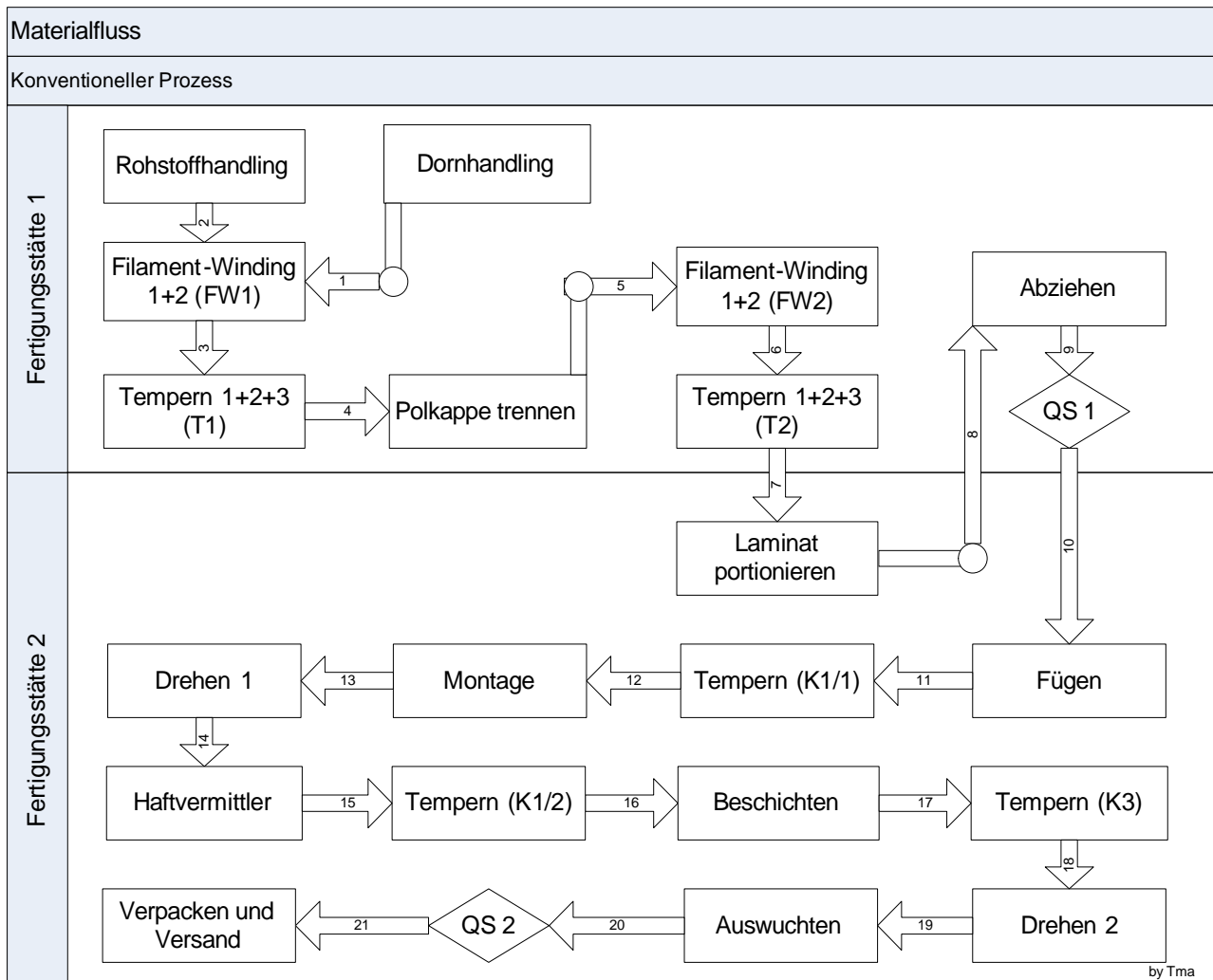


Abbildung 66: Materialfluss im konventionellen Prozess

Zu beachten ist, dass das Halbzeug in diesem Schema zweimal die **Fertigungsstätte 1** durchlaufen muss. Grund hierfür ist die Trennung von Laminatherstellung und mechanischer Bearbeitung. Dies könnte verhindert werden, wenn die Portionierung des Laminates ebenfalls im Laminatherstellungsbereich stattfinden würde, hätte aber zur Konsequenz, dass die mechanische Bearbeitung aus der **Fertigungsstätte 2** aufzutrennen wäre. Grundlage für diese Aufteilung im konventionellen Prozess ist der Ansatz, dass die Arbeitsaufteilung zwischen Urformen und Bearbeitung fachlich und räumlich getrennt sein soll. Die Qualitätssicherung findet ursprungsbezogen in den einzelnen Fertigungsstätten statt. Die erste Qualitätssicherung (**QS1**) betrifft aber nur das Laminat als solches ohne Beschlagteile. Hier werden die reinen geometrischen Maße abgenommen. Verzichtet wird im laufenden Prozess auf Messungen des Faser- volumengehaltes, da dieser indirekt über dem Wickelaufbau und somit über die Geometrie definiert wird. Das Schema verdeutlicht den hohen Bedarf an Abwicklungs- oder auch

Handlingzeiten, somit den zeitlichen Bedarf, der zum reinen Bewegen von Werkzeug, Halbzeug oder der auslieferungsfähigen Walze notwendig ist, ohne die reinen Maschinenlaufzeiten. Im konventionellen Prozess wurden daher folgende Abwicklungszeiten pro Walze, bezogen auf die Sektion, über Zeitaufnahme, vgl. Tabelle 22 im Anhang unter Kapitel 9, erfasst. Die Personalaufwendungen zur Deckung der Abwicklungszeiten werden pro Jahr mit mehreren 100 t€ veranschlagt.

5.5 Analyse des konventionellen Prozesses

Um Verbesserungen anwenden zu können, muss der Prozess zuerst analysiert und verstanden werden. Unternehmen sind dann besonders erfolgreich, wenn sie ihre Ressourcen, wie Maschinen und Mitarbeiter, möglichst effizient einsetzen. Die von der Business School of London über Jahre durchgeführte Studie hat ergeben [MSc 09], dass nur etwa ein Drittel der Unternehmungen, die an der Untersuchung teilgenommen haben, in ihrem Arbeitsgebiet Exzellenz erreicht haben. Als exzellent wird eine Firma bezeichnet, wenn diese mindestens in einem Bereich Weltmarktführerschaft erreicht hat.

Personalbedarf und Schichtauslastung im konventionellen Prozess

Im Anhang unter Kapitel 9, Abbildung 105, sind der Personalbedarf und die Schichtauslastung im konventionellen Prozess für die einzelnen Sektionen aufgeschlüsselt. Sektion **S1** und **S2** arbeiten ergänzend zusammen, um kontinuierlich mit mindestens zwei Mann pro Schicht belegt zu sein. Somit werden für die Sektionen **S1** bis **S6** insgesamt 34 Werker benötigt. Nicht beachtet sind hierbei die Sektionen **S7** bis **S9**, welche sich mit Qualitätssicherung, Verpackung und Versand sowie reinen manuellen Tätigkeiten beschäftigen. Diese sind von der Betrachtung ausgeschlossen, weil sie nicht unmittelbar mit der Herstellung der Bauteile verknüpft sind. Sektion **S2** und **S3** sind dreischichtig zu belegen, insgesamt sind hier 12,4 Mitarbeiter aktiv. 9,3 Mitarbeiter arbeiten in der Sektion **S5**, hier sind vier unterschiedliche Arbeitsschritte zu erledigen.

Abwicklungszeiten im konventionellen Prozess

Durch das dominant manuelle Handling der Halbzeuge entstehen sogenannte Abwicklungszeiten. Diese zeitlichen Aufwendungen sind zwar notwendig, jedoch nicht unmittelbar produktiv. Definiert beschrieben sind im Anhang unter Kapitel 9, Abbildung 106, die Bewegungszeiten zu den einzelnen Bearbeitungsstationen. Bei einer jährlichen Bauteilrate von 8.000 Stück würde dieser Abwicklungsaufwand von 7,4 Mann pro Tag kalkulatorisch (Krankheit und Urlaub inbegriffen) zu Buche schlagen. Infolgedessen erhöhen sich die Personalaufwendungen pro Jahr um 407 t€. Angelehnt an die Herstellkosten der 8.000 Stück wäre dies eine Relation von 2 % an den HK.

5.5.1 Herstellkosten

Die Herstellkosten setzen sich aus den Material-, Fertigungs- und Gemeinkosten zusammen. Die Hälfte des Materialanteils des Untersuchungsgegenstandes setzt sich aus Faser- und Matrixkosten zusammen. Die zweite Hälfte besteht aus dem Zukauf der metallischen Inlays (Keels). Würden die Herstellkosten somit bereinigt von den externen Leistungen betrachtet werden, so hätten die Material- und Fertigungskosten nahezu einen identischen Wert. Faserverbundbauteile haben nicht immer (jedoch meist) einen hohen Materialkostenanteil. Drei Beispiele können das verdeutlichen: a) Wickelhülsen für den Druckbereich; trotz zum Teil einiger Meter Länge liegen diese mitunter im Bereich kleiner 30 kg Faserverbundmasse. Noch extremer das Beispiel b) Atemschutzflaschen, Tanks mit einem Fassungsvermögen von 6,8 l, bei 300/450 bar weisen nur Gewicht von 3,6 kg auf

(MCS Technologies GmbH), oder wie c) Frischwasserbehälter im Flugzeugbau, Tanks mit einem Fassungsvermögen von 215 l zeigen nur eine Faserverbundmasse von 12,6 kg auf [MTA 13], vgl. Abbildung 102. In Abbildung 67 werden nur die Material- und Fertigungskosten ohne Zuschläge bewertet, diese teilen sich in Bezug auf den Untersuchungsgegenstand wie folgt auf:

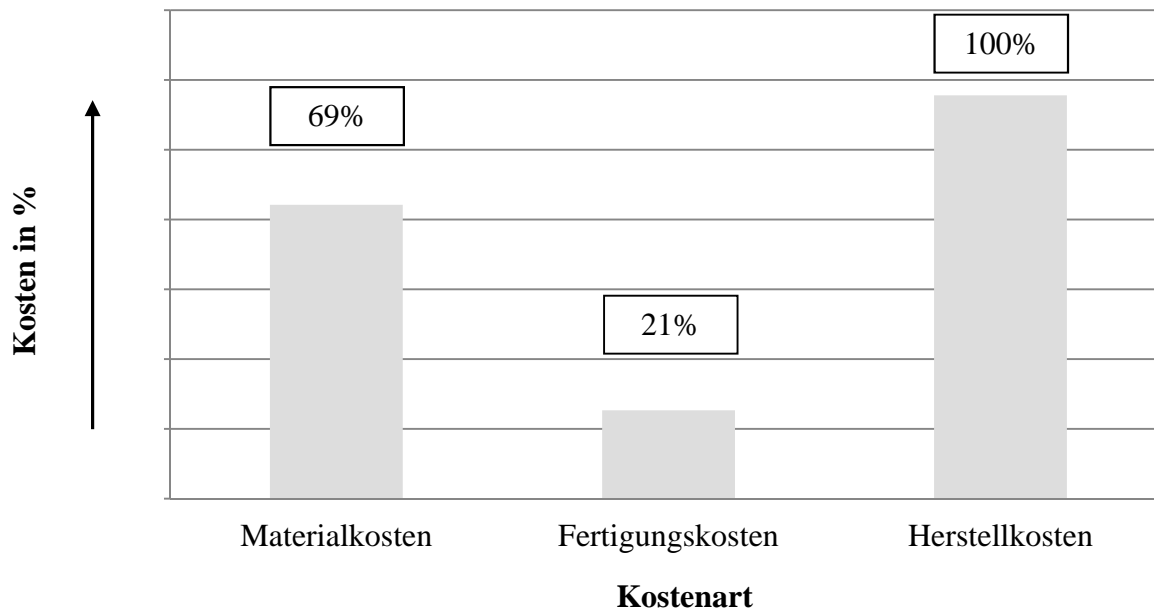


Abbildung 67: Verteilung der Kostenarten

Taktzeitverteilung der Produktionslinie

Im Folgenden ist die Verteilung der Taktzeiten der Produktionslinie, also der Ausstoß pro Zeiteinheit und Prozessschritt dargestellt. Abbildung 68 gibt die Taktzeiten der einzelnen Maschinen wieder. Hierbei ist zu beachten, dass artgleiche Maschinen, zum Beispiel Filament-Winding oder Tempern, in ihrer ganzen Kapazität betrachtet werden. Tempern 2 und der Ablängprozess bilden bei der untersuchten Konfiguration die obere Grenze. Durch die unterschiedlichen Taktzeiten der einzelnen Stationen kann kein kontinuierlicher Fertigungsdurchlauf zustande kommen, es sind somit Maschinen und Werker mit geringerer Auslastung im Prozess vorhanden.

Die Abbildung 68 zeigt auf, dass der Wickelprozess (**FW1** und **FW2**) der größte Einzelposten in der konventionellen Herstellung darstellt. Die Praxis spiegelt hierbei Zeiten in Summe (**FW1** und **FW2**) von 588 Minuten pro komplette Wickellänge zurück. Hieraus resultiert eine durchschnittliche Tapegegeschwindigkeit von 10,8m/min. Dies entspricht weniger als 40% der technisch möglichen Geschwindigkeit. Grund hierfür ist hauptsächlich der Aufbau der Kohlenstofffaserspulen, welche im Schnitt bei einer Titerzahl von 3,3 g/m eine Masse von circa 8,4kg mal 12 Spulen tragen. Rein rechnerisch sind somit pro halbes Laminat 1,3 mal 12 Spulenwechsel notwendig. Somit stehen pro Wickeltag 15,7 Wechsel an. Aufgrund des Sachverhaltes, dass die Faserspulen aus heutigem Stand nahezu niemals die gleiche Ausgangsmasse haben (die Lieferanten behalten sich Schwankungen im Bereich $\pm 0,6\text{kg}$ zu liefern vor), ist es auch nicht möglich, die Maschinenstopps zielgerichtet zu disponieren. In der Regel erkennt der Maschinenführer rechtzeitig, dass eine Spule zu Ende geht, und steuert die Maschine entsprechend in die Parkposition.

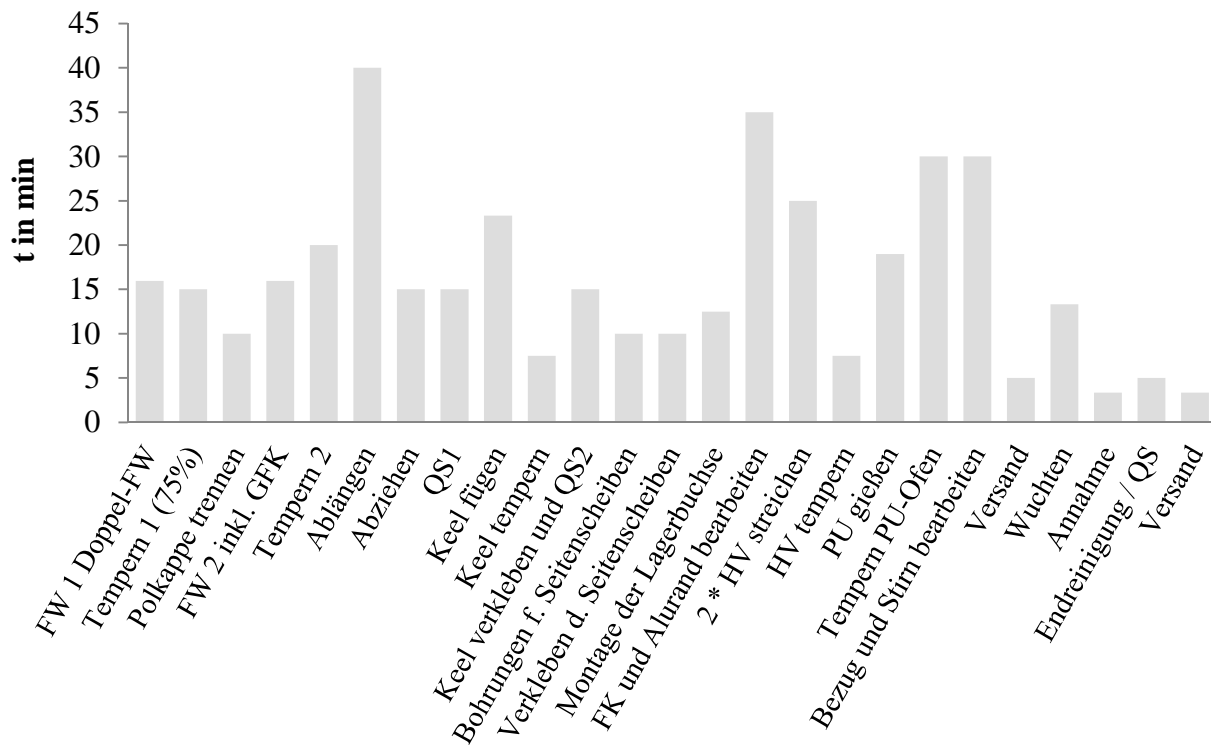


Abbildung 68: Taktzeiten der Produktionslinie [TMa 11]

In seltenen Fällen kommt es aber auch zum kompletten Verlust der Faser, diese muss danach aufwendig wieder durch die trockenen und nassen Führungen eingefädelt werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass pro Spulenwechsel circa acht Minuten benötigt werden, ehe die Maschine wieder stationär läuft.

Beschaffung Keel (kv)

Um die Krafteinleitungselemente fügen zu können, wird nach dem Abziehen des Werkzeuges, meist unmittelbar nach dem Entformen, der Innendurchmesser des FK-Rohres durch manuelles Vermessen erfasst. Dies geschieht mit einem Drei-Punkt-Innenmikrometer, das pro Seite in zwei Tiefen (vordere und innere Keel-Kante) je zweimal den Innendurchmesser ermittelt. In der Regel sind alle vier Maße pro FK-Rohr-Seite im Bereich von drei hundertstel Millimetern deckend. Auf den gemittelten Innendurchmesser wird nun ein Übermaß im Promillebereich aufgeschlagen, beim Untersuchungsgegenstand ist der Presssitz mit 0,3 mm definiert, vgl. Abbildung 44.

Lagerhaltung

Nachteilig bei der gewählten Beschaffungsart ist der in Zusammenhang stehende zeitliche Verzug von der Erfassung des Passmaßes bis zum Liefern des Krafteinleitungselementes. Hier vergehen im Schnitt fünf bis sieben Arbeitstage. In dieser Zeit werden die bereits vermessenen Halbzeuge zwangsweise gelagert. Dies bedeutet, dass circa 200 Stück Halbzeuge aufgelagert werden müssen. Dies geschieht in einer getrennten Lagerhalle. Die Anforderungen an die Halle ist im Wesentlichen ein stabiles Temperaturspektrum von 15 bis 28 °C, um Kondensatbildung wie auch übermäßige Staubbelastung durch eine geschlossene Bauweise zu vermeiden. Nicht geeignet sind nur überdachte Abstellplätze. Idealerweise werden die FK-Halbzeuge entsprechend der Philosophie „first in, first out“ behandelt. Dies hat unter anderem den Vorteil, dass der Nummernkreis der ausgehenden Produkte konstant aufsteigend ist (ausgenommen prozessbedingt

geblockte Ware. Weiterhin besteht hier auch die Möglichkeit, gleichzeitig die Beschlagteile als auch Verbrauchsstoffe, wie Drehmeißel etc., auf kleinem Vorrat zu halten. Zudem ist ein zusätzliches Lager für die Verbrauchskemikalien, wie Harz, Härter, Beschleuniger, Klebstoffe etc., notwendig. Die relevanten Sicherheitsvorschriften nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz sind hierbei zu beachten. Generell sollte der Lagerbestand auf ein Minimum reduziert werden.

Mitarbeiter

Die Anforderungen an die Mitarbeiter können nicht hoch genug eingestuft werden [Brf 08]. Hier sind zwei Trends zu erkennen:

1. Anlernen von berufsfremd ausgebildetem Personal zu prozessorientierten Fachkräften. Hierfür sind zwei Gründe zu nennen: a) lokale Gegebenheiten, sodass manche Berufsgruppen erst gar nicht zur Verfügung stehen, oder b) dass der Anspruch der Unternehmung an das Personal entsprechend gering ist. Besonders im Hinblick darauf, dass im Vergleich zur metallischen Bearbeitung, der eigentliche Werkstoff bereits vorhanden ist, muss in der Faserverbundfertigung dieser erst noch urgeformt (erzeugt) werden. Dies erhöht die Komplexität und somit auch die Fehleranfälligkeit im Prozess, vgl. hierzu auch die Lernkurve im konventionellen Prozess. Sehr sensibel zeigt sich der Prozess im Einsatz von Leih- oder Aushilfskräften, besonders dann, wenn die Werker unmittelbar parametrisierbare Arbeiten ausführen müssen, zum Beispiel beim Filament-Winding-Verfahren, das hohe Anforderungen an den Operator stellt.
2. Einsatz von artspezifisch gut ausgebildeten Fachkräften. Dies bedeutet, dass im Bereich der Composite-Fertigung entsprechend nur Kunststoffformgeber zum Einsatz kommen, im Bereich der spanenden Bearbeitung nur Zerspanungstechniker oder ähnlich verwandte Berufsgruppen. Sehr sinnvoll haben sich interne Graduierungen erwiesen, wie an einem Beispiel aufgeführt. Unmittelbar nach der Einstellung eines Mitarbeiters wird dieser einem bereits graduierten Mitarbeiter, bezeichnet als Professional, zur Seite gestellt, bis eine Reife, bezogen auf eine oder mehrere Maschinen/Arbeitsprozesse erreicht worden ist. Zudem besteht die Möglichkeit, dass Facharbeiter (Professionals) sich zum Supervisor ausbilden lassen. Dieses Beispiel hat im Personal den Effekt, dass die Fähigkeiten gezielt weitergegeben werden und ein unerwünschter Fremdwuchs in den Prozessen nicht stattfindet.

„Heute spricht man in allen Organisationen ganz selbstverständlich vom Menschen als wertvollstes Kapital, doch nur wenige praktizieren, was sie postulieren.“ [Dpe 00] Um eine Steigerung der Produktqualität zu erreichen, muss das Management ständig Interesse für die tagtäglichen Schwierigkeiten aufbringen. Nur dann erkennen die Mitarbeiter, dass sie bei der Lösung der Probleme unterstützt werden [GHK 03], [GRT 07]. In den Toyota-Fabriken sind die Werker die wichtigste Größe im Produktionsprozess. Toyota hat verstanden, dass die Investition in die Qualifizierung der Mitarbeiter der entscheidende Wettbewerbsvorteil ist, im Kampf um Qualität und Kosten. Kontinuierliche Prozessverbesserung heißt kontinuierliche Qualifizierung der Mitarbeiter [Rom 08]. Toyota unterrichtet Bandmitarbeiter in speziell dafür vorgesehenen Trainingszentren, bevor sie im Echtbetrieb eingesetzt werden. Beispielsweise werden Lackierer mit speziellen Wassertrainingsanlagen geschult. An diesen übt der Mitarbeiter das Lackieren eines Autos. Das verbrauchte Wasser wird aufgefangen und die Zielmengen verglichen. Darüber hinaus zertifiziert Toyota sogenannte Mastertrainer, die Toyotas Trainer ausbilden und beraten. Schulungen bei Toyota sind stark auf Begründungen, Schwerpunkt und Wiederholung ausgerichtet [Rom 08].

5.5.2 Lernkurve

Von den untersuchten Walzen, die im konventionellen Prozess hergestellt wurden, ist, wie in Abbildung 69 aufgeführt, die Nachkalkulation auf Basis der Herstellkosten ermittelt worden.

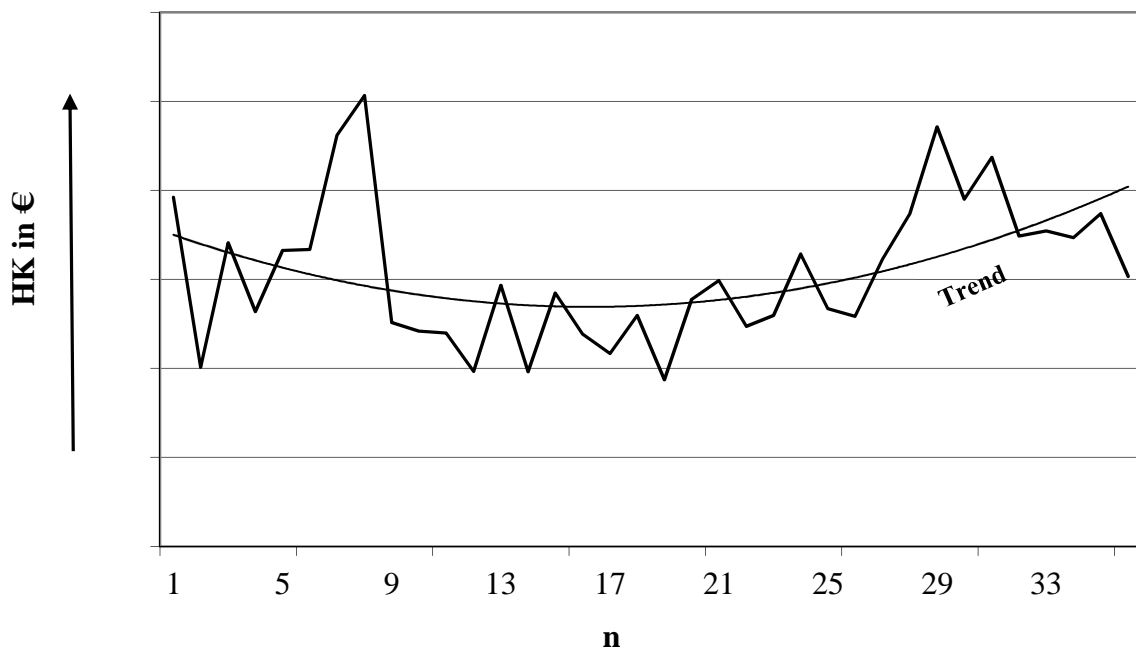


Abbildung 69: Qualitative Nachkalkulation der ersten Untersuchungstypen [TMa 11]

Jede laufende Nummer **n** besteht aus mehreren Walzen. Grund hierfür ist der Sachverhalt, dass auf einem Werkzeug, entsprechend der Länge, mehrere FK-Halbzeuge hergestellt werden, diese sind auch in entsprechender Losgröße nachkalkuliert worden. Der untypische Verlauf der Lernkurve resultiert daraus, dass während der Testserie die technischen Anforderungen nochmals verschärft wurden. Qualitativ lassen sich die Effekte wie folgt beschreiben. Unmittelbar nach dem Produktionsstart stellten sich positive Ratio-Potenziale ein, überlagert von einer im laufenden Betrieb vorgenommenen Verschärfung der Toleranzen, was zu höheren Aufwendungen und somit zu einem negativen Effekt führte. Dies spiegelt sich entsprechend auch in Abbildung 69 wider.

Die Abbildung 70 zeigt das aufgenommene Fehlerbild mit Häufigkeit in der Testserie. Jede aufgelistete Abweichung forderte eine Nacharbeit am Produkt. Besonders kostenintensiv kristallisierte sich der Planschlag heraus, was dazu führte, dass eine zusätzliche Maschine konstruiert und angeschafft werden musste. Unter **Sonstige** wurden Fehler aufgenommen, welche sich nicht den definierten Kriterien haben zuordnen lassen. Hier kam es im Fertigungsprozess im Vergleich zum Laborbetrieb zu einer vorher nicht gekannten Charakterisierung von Abweichungen. Dies spiegelt auch die im Faserverbundbereich gern unterschätzte Übergangshürde zur Serie wieder. Besonders positiv zeigte sich die sehr geringe Ausschussrate von kleiner 1 %. Dies ist u.a. dadurch zu erklären, dass stets zeitnah versucht wurde die erkannten Abweichungen der Testserie manuell zu bereinigen. Dies hat in Folge diese Produktionskennzahl positiv beeinflusst. Besonders auffällig an der Testserie waren Abweichungen bei der Laminaterzeugung, welche aufgrund der hohen Wandstärke initiiert wurden, zu vermerken.

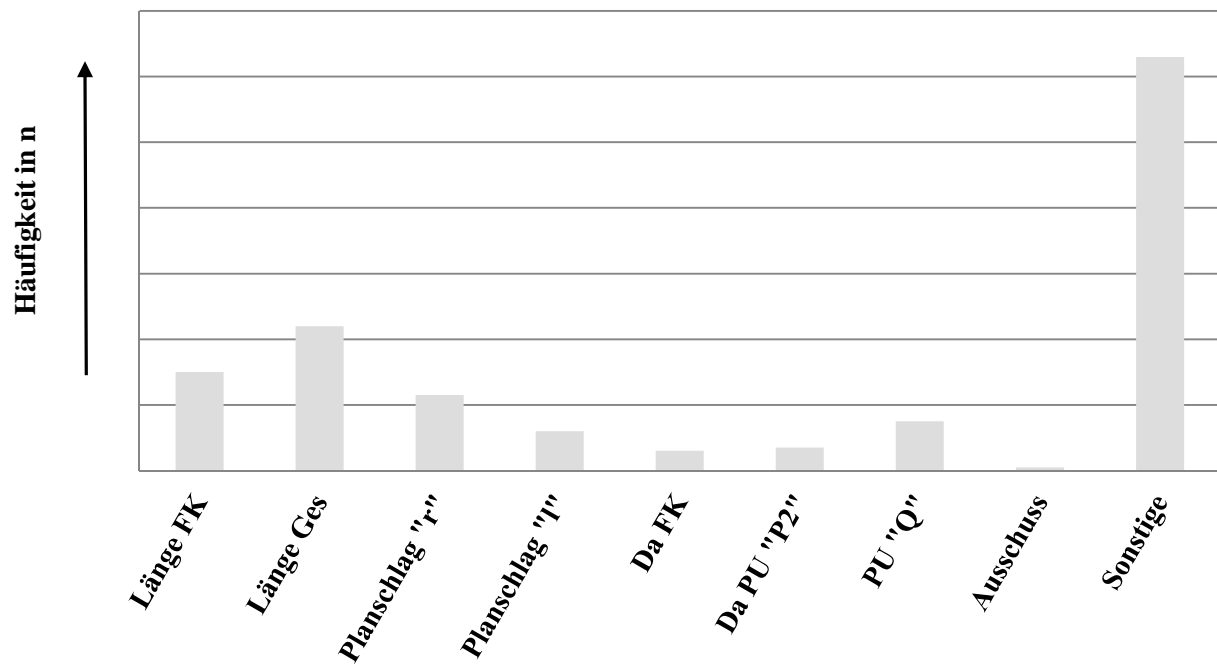


Abbildung 70: Aufgenommene Fehlerhäufigkeit [TMa 11]

Ein aufgrund der Laborcharakteristik typisches Merkmal war der häufige Wechsel der zur Verfügung gestellten Produktionsarbeiter. Dies zog eine höhere Nacharbeitsquote nach sich, was in Folge ebenfalls den Prozess mit einer negativen Wirkung belegte. Gegen Ende der vorgeschalteten Testserie war zu erkennen, dass es mit mehr Routine zu positiven Qualitäts- und Kosteneffekten kam. Es darf davon ausgegangen werden, dass sich der typische Verlauf der Erfahrungskurve in weiterer Folge eingestellt.

6 Der Leane Ansatz in der Composite-Fertigung

6.1 Zielstellung

FUJIO CHO, einer der erfolgreichsten Automanager (Toyota), definierte nur Tätigkeiten, für die der Kunde bereit ist, Geld auszugeben als wertschöpfend. Das Ziel des Leanen Ansatzes ist es nun, bei vollem Verständnis der Vorgänge, Wartezeiten und Produktionsfehler zu minimieren, idealerweise zu eliminieren, den Transport des Halbzeuges und die Bestände auf ein absolut notwendiges Minimum zu reduzieren sowie die Arbeitsprozesse zu optimieren. Weiterhin soll die Qualität durch geschulte und autarke Mitarbeiter auf ein hohes Niveau gesetzt und gehalten werden. Die Fertigungsfläche soll ideal den Forderungen des zu produzierenden Bauteils angepasst sein. All das dient dem Ziel, die Fertigungskosten auf ein Minimum zu reduzieren, vgl. hierzu die Definition zum konventionellen Prozess in Kapitel 2. Bei der Untersuchung werden die Materialkosten als fix angesehen, um den Fokus gezielt auf den Prozess zu richten. Weiterhin sind im Leanen Ansatz die Erfahrungen der Mitarbeiter umzusetzen.

TAYLOR (1856-1915) gilt als ein Pionier der modernen Betriebsführung [Hew 99]. Er entwickelte Methoden, welche die Produktivität und auch die Gewinne der Unternehmen steigerten. Weiterhin versuchte er, sowohl den Stellenwert der einfachen Arbeiter als auch den Wohlstand in der Bevölkerung zu erhöhen. Seine Methoden waren aber umstritten. Er erfuhr starken Widerstand von den Gewerkschaften und den Unternehmern selbst. Sein Wirken bestand darin, Arbeitsmethoden und Prozesse nicht auf Basis traditionellen Handelns, sondern aufgrund von wissenschaftlichen Analysen zu festigen. Sein Drang zur Perfektion der Betriebsführung führte zu einer Auseinandersetzung um seine Lehre, welche im Jahr 1912 in einer Fünf-Tage-Anhörung im Repräsentantenhaus endete (Hoxie-Report) [Hew 99]. FORD (1863-1947) ließ 1908 sein legendäres T-Modell vom Band laufen. Sowohl FORD als auch TAYLOR hatten ein besonders positives Verhältnis zu den Menschen in den Produktionsstätten. So führte FORD unter anderem den Acht-Stunden-Tag ein. Trotzdem führten die Fordschen Produktionsmethoden aufgrund der Monotonie zu einer erheblichen Fluktuation in der Belegschaft.

Die Kritikpunkte am Taylorismus sind folgende:

- Trennung von Kopf- und Handarbeit
- die Zerlegung der Arbeit in immer kürzere, sinnentleerte und monotone Arbeitsfolgen
- die Ausbeutung des Arbeiters durch hohe Leistungsvorgabe und Verdienstanreize.

6.2 Lean Prozess in der Umsetzung der Sektionen

Robotik

Die VDI-Richtlinie 2860 definiert den Begriff Roboter wie folgt: „Ein Roboter ist ein universell einsetzbarer Bewegungsautomat mit mehreren Achsen, dessen Bewegungen hinsichtlich Folge und Wegen bzw. Winkeln frei programmierbar (das heißt ohne mechanischen Eingriff) und gegebenenfalls sensorgeführt sind. Sie sind mit Greifern, Werkzeugen oder anderen Fertigungsmitteln ausrüstbar und können Handhabungs- und/oder Fertigungsaufgaben erfüllen“ [VDI 90].

Änderung zum konventionellen Prozess

Mit dem Ziel „Werte schaffen ohne Verschwendung“ bietet das Leane System eine vielfältige Auswahl, um für die jeweiligen Prozesse die richtigen Ansätze umzusetzen. Aufgrund der vorherrschenden Bauteilidentität in Kombination mit hoher Wiederholungsfrequenz ist der gezielte Einsatz von Robotern zu untersuchen. Die vorliegende Werkstattfertigung mit parallelen Bearbeitungseinrichtungen verlangt eine Summe von Hebevorrichtungen, angefangen vom Deckenkran bis hin zu den lokalen Portalkrananlagen. Deckenkrananlagen, besonders bei hohen Lasten oder großen Arbeitsbreiten, sind in den Ausführungsgeschwindigkeiten sehr reduziert. Zudem ist das Überstreichen der Produktionsfläche mit angehängten Lasten in Bezug auf die Arbeitssicherheit bedenklich. Die markanteste Änderung wird jedoch sein, einen gezielten Fluss in die Herstellung des Bauteils zu realisieren, um somit einen Fließfertigungscharakter zu erzeugen. Der Untersuchungsgegenstand soll somit maximal wertschöpfend hergestellt werden. Unproduktive Transportzeiten sind nach Möglichkeiten zu eliminieren. Der menschliche Einsatz ist auf rein produktive Aktionen zu reduzieren.

Rüstzeiten

Rüstaufwendungen verschwenden produktive Zeiten und erhöhen die Lieferzeiten der Produkte. Dennoch sind diese Tätigkeiten notwendig, um neue Produkte in die Linie aufzusetzen oder Wartung an Werkzeugen vorzunehmen oder nur für den neuen Einsatz vorzubereiten. Alleine mithilfe der Optimierung der Rüstablauforganisation lässt sich erheblich Zeit und somit Geld einsparen. Der Ansatz ist nun, das Rüsten im Filament-Winding-Bereich wie folgt zu reduzieren:

- Die Versorgung mit Laminiermittel (Matrix) wird über Misch- und Dosieranlagen erfolgen. Idealerweise werden die Harz-Härter-Komponenten unmittelbar an der Wickelmaschine positioniert und über Versorgungsleitungen automatisiert in die Imprägnierstrecke eindosiert. Somit fällt ein erheblicher Anteil der Rüst- und Versorgungsarbeiten nahezu auf null.
- Das Werkzeug wird über eine Handlingvorrichtung mannlos ein- und ausgebracht und fixiert. Spezielle Vorrichtungen an der Wickelmaschine spannen axial und radial gleichzeitig.
- Der Spulenwechsel ist zeitlich getaktet, sodass die Maschinenstopps minimal werden. Während eines Stopps wird der Faserrohstoff komplett gewechselt.

6.2.1 Störfunktion „Doppelwickeln“

Der Untersuchungsgegenstand ist mit einer FK-Wandstärke von 50mm definiert. Eine derart hohe Wandstärke im konventionellen Prozess toleranzgenau zu applizieren ist zwar theoretisch möglich, scheitert jedoch oft an der starken Prozessstreuung, die bei der Laminatherstellung eingebracht werden. Dies lässt sich wie folgt erklären:

- Das Laminiersystem wird manuell vor dem Wickelprozess unter Verwendung teilautomatisierter Systeme angemischt und vorgeheizt. Ab diesem Zeitpunkt beginnt die Topfzeit zu laufen. In der Regel werden mehrere Fünf-Liter-Gebinde für den Wickelprozess vorbereitet und gelagert.
- Die erste Wickellage wird mit einem deutlich höheren Harzgehalt gefahren, meist dadurch gesteuert, dass der Rakel am Imprägniersystem komplett geöffnet wird.
- Die nächsten drei Kreuzlagen werden nun mit minimalem Rakelspalt gefahren, gerade so viel, dass ein homogener Film entsteht. Das optische Erscheinungsbild ändert sich nun.

Wenn der Eindruck entsteht, dass ein Harzunterschuss vorhanden ist und der Glanz durch das Matrixsystem verschwindet, ist die Einstellung als optimal zu bezeichnen.

- Nun werden stochastisch die ersten Faserspulen zum Ende laufen und durch volle Spulen substituiert werden. Die verwendete Verbindungstechnik, Verknoten oder Verkleben, sorgt für eine Verstellung des Rakelspaltes, der Harzgehalt im Laminat beginnt wieder zu steigen.
- Infolgedessen kommt es zu einem Aufschwimmen der Lagen, es muss manuell eingegriffen und nachjustiert werden.
- Der Polbereich (Faserwendezone) lässt keine definierte Ablage mehr zu, der zu hohe Harzgehalt führt zu einem starken Verrutschen des Tapebandes, der gestörte Bereich wächst und führt in Folge dazu, dass der Randbereich jener Walzen (Werkzeugende) sehr empfindlich ist.

In der Regel ist aufgrund des aufgezeigten Schemas im Wickelprozess, unter Verwendung von Heavy-Tow-Fasern sowie einer engen Toleranzgrenze im Durchmesser von einem Millimeter, ein Wandstärkemaximum pro Wickeltag von 30mm erreicht. Grundlage für eine Verlängerung der Wickelzeit ist unter anderem, dass das Laminiersystem verwendungsnah in die Imprägnierwanne eingelassen wird. Eine Misch- und Dosieranlage mit in der Schleppkette verlegtem Schlauchpaket kann hier für Abhilfe sorgen. Weiterhin ist es ratsam, aufgrund der hohen Wickelgeschwindigkeit zum einen und der Wärmeabfuhr zum anderen, die Imprägnierwanne möglichst klein auszulegen. Die Verwendung der MD-Anlage würde dies erlauben. Besondere Gefahrstellen bilden strömungstechnische Totstellen im Harzbad, welche exothermische Reaktionen fördern. Weiterhin muss der Imprägnierbereich von Luftströmungen, erzeugt durch die Verfahrensbewegung des Supports, geschützt werden. Im konventionellen Prozess ist es notwendig, mithilfe manueller Einstellungen am Harzbad, ständig Korrekturen an der Imprägnierung vorzunehmen. In der Regel sind dies durch Rändelräder betätigte Gewindestangen, welche die Positionierung des Dosierakels zur Tränkwalze definieren. Jeder Werker hat hier zudem ein anderes „Gefühl“ für die beste Einstellung, da der Harzfilm verfahrensbedingt nur über das Auge beurteilt werden kann. Im Leanen Prozess wird dies durch kameragesteuerte Bilderkennung ersetzt, Servomotoren positionieren die Einstellung des Spaltes nach immer gleichen Vorgaben. Auch wird es im Leanen Prozess nötig sein, dass die Fasern miteinander verbunden werden. Um nun zu verhindern, dass dadurch der Rakelspalt ungewollt manipuliert wird, ist die Aufhängung der Blades so zu wählen, dass ein Knoten (o.ä. Verbindungstechnik) den Blade gezielt kurz anhebt und er mittels Federtechnik rückgeführt wird, also unmittelbar später wieder in die vorherige Ausgangsposition zurückfällt. Alternativ wäre die Möglichkeit, dass ein optisches System Verdickungen erkennt und das gesamte Tränksystem kurzzeitig anhebt. Ein wichtiger Schritt, um die Streuung der Parameter zu reduzieren, ist ein einheitlicher Stopp zum Wechseln der Fasern. So wäre es ideal, wenn die angelieferten Spulen eine der Notwendigkeit angepasste Lauflänge aufweisen könnten. Dies würde ermöglichen, dass es innerhalb vom Prozess nur einmal zu einem Stopp in Kombination mit einem Faserwechsel kommt. Zum Vergleich Standardspulen weisen eine Lauflänge von 2.500 Metern bei einem Gewicht von circa 8,2kg auf.

Auswirkung der Änderungen auf die Wickelzeit

Die gezeigten Änderungen führen zu den in Tabelle 17 aufgelisteten Resultaten. Die Zeiten spiegeln iterativ den eingeschwungenen Zustand wider. Zur Berechnung wurden die Einzelschritte aufsummiert. Die konventionelle Wickelzeit wurde für den ersten Wickeltag mit brutto 243 Minuten erfasst, hierin enthalten sind auch die Faserwechselzeiten (*1). Der Rüstprozess geht mit 90 Minuten in die Zeitaufschreibung ein. In Summe ergibt der Leane Wickelprozess somit einen zeitlichen Vorteil von 304 Minuten. Dies entspricht einer Verbesserung von 45 %.

Tabelle 17: Gegenüberstellung der Zeiten im Wickelprozess [TMa 11]

Bezeichnung	FW konventionell	FW lean
	[min]	[min]
Rüsten 1	90	45
FW 1	243	118
Rüsten 2	90	45
FW 2	243	118
Kollektiver Faserwechsel	0 (*1)	36
Summe:	666	362

Diese Modifikation enthält noch nicht die Verbesserungen aus dem einmaligen Temperprozess sowie den damit verbundenen Handlingvorteilen. Im Weiteren hat dies auch Konsequenzen auf die Anzahl und die Größe der Maschinen, was im folgenden Kapitel bearbeitet wird.

Beschreibung der Maschinen für den Leanen Prozess

Die für den Leanen Prozess notwendigen Maschinen sind im Anhang unter Kapitel 9, Tabelle 25 zu finden. Im Wesentlichen unterscheidet sich der Maschinenpark zum konventionellen Prozess dadurch, dass monotone Arbeiten mittels Handlingsautomaten weitgehend substituiert werden. Weiterer wichtiger Unterschied ist die Verwendung von Durchlauföfen. Hier werden zwei Ziele verfolgt:

1. Die aufeinanderfolgenden Zonen im Ofen sind isotherm, was bedeutet, dass die einzelnen Temperaturbereiche keine alternierende Heizkurve fahren. Im Vergleich zu den Schubladenöfen werden die Durchlauföfen während des Arbeitens nicht geöffnet. Diese ziehen sich automatisiert das zu tempernde Halbzeug mittels Einzug in die erste Zone und geben es zeitversetzt im Auslass wieder frei. Der Ofen gibt somit nach außen im Idealfall weder Wärme noch Reaktionsdämpfe ab.
2. Das Be- und Entladen erfolgt mittels Kranautomaten, der Operator kommt im regulären Betrieb nicht in Kontakt mit dem Ofen. Weiterer Unterschied ist, dass Flurförderarbeiten mannlos ausgeführt werden. Mithilfe von Shuttles werden die Halbzeuge innerhalb der Linie bewegt. Markanter Unterschied ist der Beschichtungsbereich. Innerhalb dieser Anlage wurde komplett auf den Einsatz von Operatoren verzichtet. Lediglich zwei Arbeitsplätze sind mit Werkern besetzt. Die neun Bereiche innerhalb der abgeschlossenen Beschichtungsanlage werden über einen vielachsigen Roboter bedient. Die Drehautomaten verfügen über automatische Spannvorrichtungen, um die Halbzeuge mannlos zu arretieren.

6.2.2 Sektionen

Im Folgenden finden die Sektionen des Leanen Prozesses ihre Erklärung.

6.2.2.1 Sektion 1 bis 3

Abbildung 71 zeigt die Sektion 1 bis 3. In der ersten Fertigungszelle wird das FKV-Laminat hergestellt. Dieser Bereich arbeitet somit ausschließlich mit den Rohstoffen Harz und Faser. Das Dornlager 1 hat zweierlei Funktionen. Zum einen dient es der Möglichkeit, die Wickelwerkzeuge vor dem Aufnehmen auf die FW-Maschine für den Prozess vorzubereiten, zum anderen dient es als Puffer, falls der laufende Prozess ins Stocken gerät. Das Wickelkernlager wird vom

Portalroboter **4** bedient. Weiterhin besteht die Möglichkeit, zum Beispiel defekte Werkzeuge aus der Fertigungszelle gezielt auszuschleusen, vgl. Schleuse hinter dem Dornlager **1** in Abbildung 71. Die Rohstoffe werden in Position **2** für den Werker zugänglich positioniert. Hierin befinden sich, in Kartuschen vorpositioniert, die auf korrekter Länge gehaltenen Faserspulen. Die Vorratsstanks sind mit der Misch- und Dosieranlage (**Misch 1**) verbunden. Diese Vorratsstation wird über einen manuellen Prozess von außerhalb der Produktionslinie befüllt. Die Wickelmaschine **3** wird über den Operator bedient, dieser hat mehrschichtige Aufgaben. Er sorgt während des laufenden Prozesses der Maschine **3** für das Rüsten der Werkzeuge im Dornlager **1**, weiterhin wechselt er die Fasern im Spulenständer. Er behebt Probleme während der Laminatherstellung selbst, zum Beispiel einen Faserriss, und er führt während und nach der Herstellung kleinere Wartungs- und Reinigungsarbeiten durch. Die Übergabe der Wickelkerne als auch der „nassen“ Lamine erfolgt über den Portalroboter **4**. Der Wechselprozess wird manuell durch den Operator eingeleitet. Die Wickelmaschine nimmt zwei Wickelkerne gleichzeitig zur Bearbeitung auf. Diese werden auch automatisch gespannt, zum Beispiel pneumatisch, hier ist der Eingriff des Operators nicht notwendig. Es hat sich bei Praxisversuchen durch die Firma Waltritsch & Wachter GmbH gezeigt, dass mithilfe einer V-Prisma-Ablage [WWa 11] die Übergabegeschwindigkeit positiv beeinflusst werden kann, da das Schwingverhalten des Werkzeuges beim Einfädeln reduziert wird. Im Vergleich zu konventionellen Wickelmaschinen unterscheidet sich diese Anlage in folgenden Merkmalen: a) Über eine rezirkulierende Materialzuflussskette werden beide Imprägnierbäder mit dem Laminiermittel isotherm versorgt. b) Ein optisches System – sogenannte Closed Circuit Television Systems, wie von der Firma R. Stahl AG. angeboten – erlaubt dem Operator, Störungen frühzeitig zu erkennen und entsprechend einzugreifen. c) Weiterhin ist ein hochdynamisches IR-System installiert, welches das Wickelbauteil definiert erhitzt, um den gewünschten Faservolumenanteil zu erreichen, welches auch bei Stillständen entsprechend schnell agiert. d) Der Harzfilm auf der Imprägnierwalze wird nicht manuell, sondern über eine dreidimensionale optische Vermessung des genauen Harzfilms mit Errechnung einer echten vektorischen Raumlage des Fluids inklusive Höheninformation gesteuert.

Die Einfahrt zum Ofen **5** erfolgt über einen Übergabebereich. Hier legt der Portalroboter **4** das hergestellte „nasse“ Laminat ab. Hier endet auch der Einflussbereich des Portalroboters **4**. Ein Kettensystem übergibt das Bauteil bedarfsgerecht dem Ofen **6**. Der Ofen ist mit drei isothermen Zonen ausgerüstet. Im ersten Teil herrscht eine Temperatur von 80 °C, im mittleren Bereich 135 °C und in der letzten Zone wieder 80 °C. Gegen Ende der definierten Heizphase wird das Laminat inklusive Wickelwerkzeug dem Übergabebereich **7** übergeben. Der Portalroboter **8** nimmt nun völlig autark den bedeckten Wickelkern und übergibt diesen an die Abziehanlage **8**. Mit der Portalsäge **10** wird sowohl die erste Polkappe getrennt und im Anschluss mithilfe einer Klaue vom Wickelkern abgezogen. Die Portalsäge trennt nun auch die weiteren sechs Halbzeuge. Hierzu wird das Werkzeug in Rotation gebracht, sodass die Portalsäge nur eine Längsbewegung während des Schnittes ausführen muss. Im Anschluss wird das erste Laminat unmittelbar hinter der bereits entfernten Polkappe gegen eine Blende gezogen und somit der Wickelkern aus den Laminaten entformt. Nun ist es dem Portalroboter möglich, die sechs Lamine in die Übergabestation **11** zu übergeben. Hier werden die Halbzeuge bedarfsgerecht über ein Förderband in die folgende Sektion übergeben.

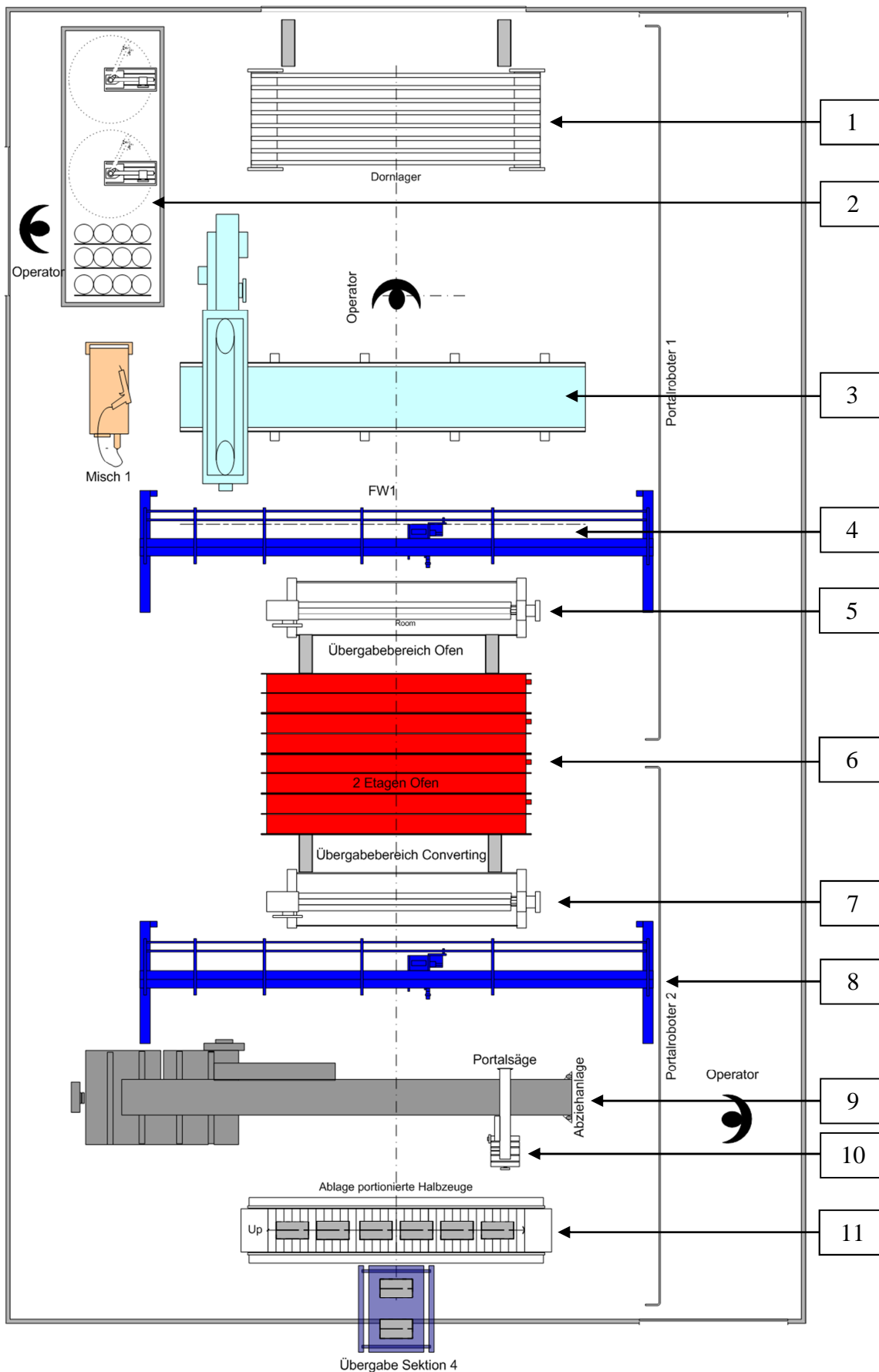


Abbildung 71: Sektion 1 bis 3

6.2.2.2 Sektion 4

Abbildung 72 zeigt die Sektion 4. In diesem Bereich werden die Halbzeuge kontrolliert (**QS 1**) und mit den metallischen Krafteinleitungselementen versehen. In der Fertigungszelle **1** werden über das Förderband die Halbzeuge bereitgestellt. Ein Handlingautomat übernimmt das FK-Rohr und stellt es dem Operator zur Verfügung. Dieser kontrolliert das Bauteil entsprechend einer definierten Checkliste.

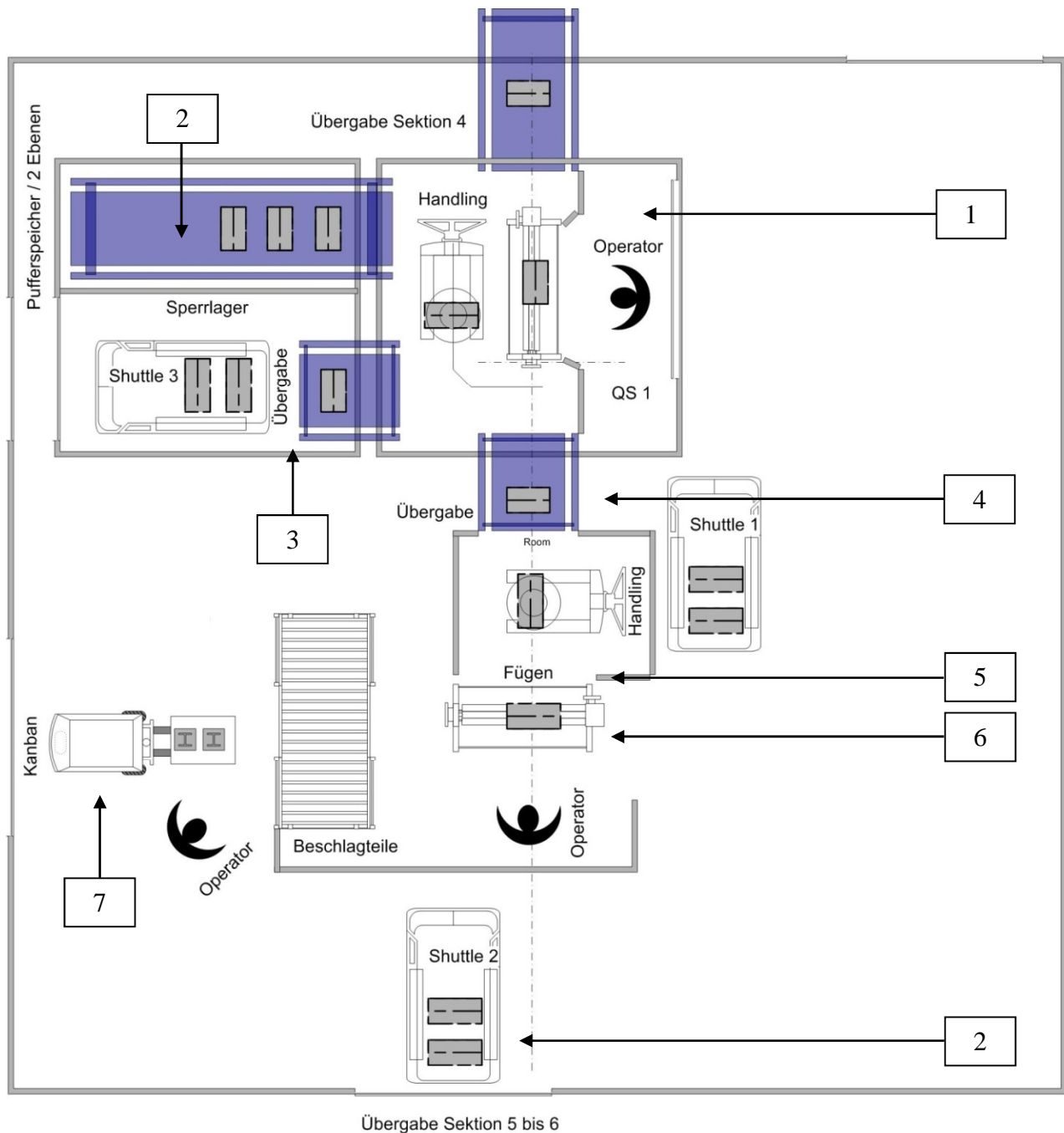


Abbildung 72: Sektion 4 Fügen

Weiterhin erfasst dieser die Innengeometrie für die Selektion der Krafteinleitungselemente. Sind Abweichungen erkennbar, wird der Prüfling in das Sperrlager 3 mithilfe des Handlingautomaten überführt. Hier werden in Zweier-Chargen (zwei pro Einheit) die Elemente aus der Fertigungslinie zur möglichen Nacharbeit oder Entsorgung verbracht. Bei positiver Prüfung wird das Halbzeug entweder in den Übergabebereich 4 oder in den Pufferspeicher 2 transportiert. Dem Pufferspeicher

kommen hierbei zwei Aufgaben zu: a) Zum einen ist er in der Lage, alle sechs Halbzeuge aus der vorhergehenden Sektion zu übernehmen, zum anderen b) kann dieser in der zweiten Pufferebene ebenfalls bereits geprüfte Halbzeuge temporär übernehmen und kurzzeitig zwischenslagern. Dies dient dazu, dass der Operator in der Fertigungszelle **1** zeitlich ununterbrochen alle Lamine aus der vorhergehenden Sektion abarbeiten kann.

6.2.2.3 Sektion 5 bis 6

Die Sektion 5 und 6, siehe Abbildung 73, ist wie folgt definiert. Das Halbzeug wird in Position **0** in Zweierpacks angeliefert. Dies geschieht mit einem Flurförderer. Der Roboter **300** entnimmt den Rohling nach Freigabe durch den Werker und führt diesen in die Position **2**. Hier sind die Hilfsmittel aus Lager **H** für die Bearbeitung durch einen Werker zu montieren. In der Folge führt der Roboter den Rohling in die Position **3**. In diesem Bereich wird ohne menschlichen Einsatz die Oberfläche mit einer Schleifscheibe überarbeitet und für den Haftvermittlerauftrag vorbereitet.

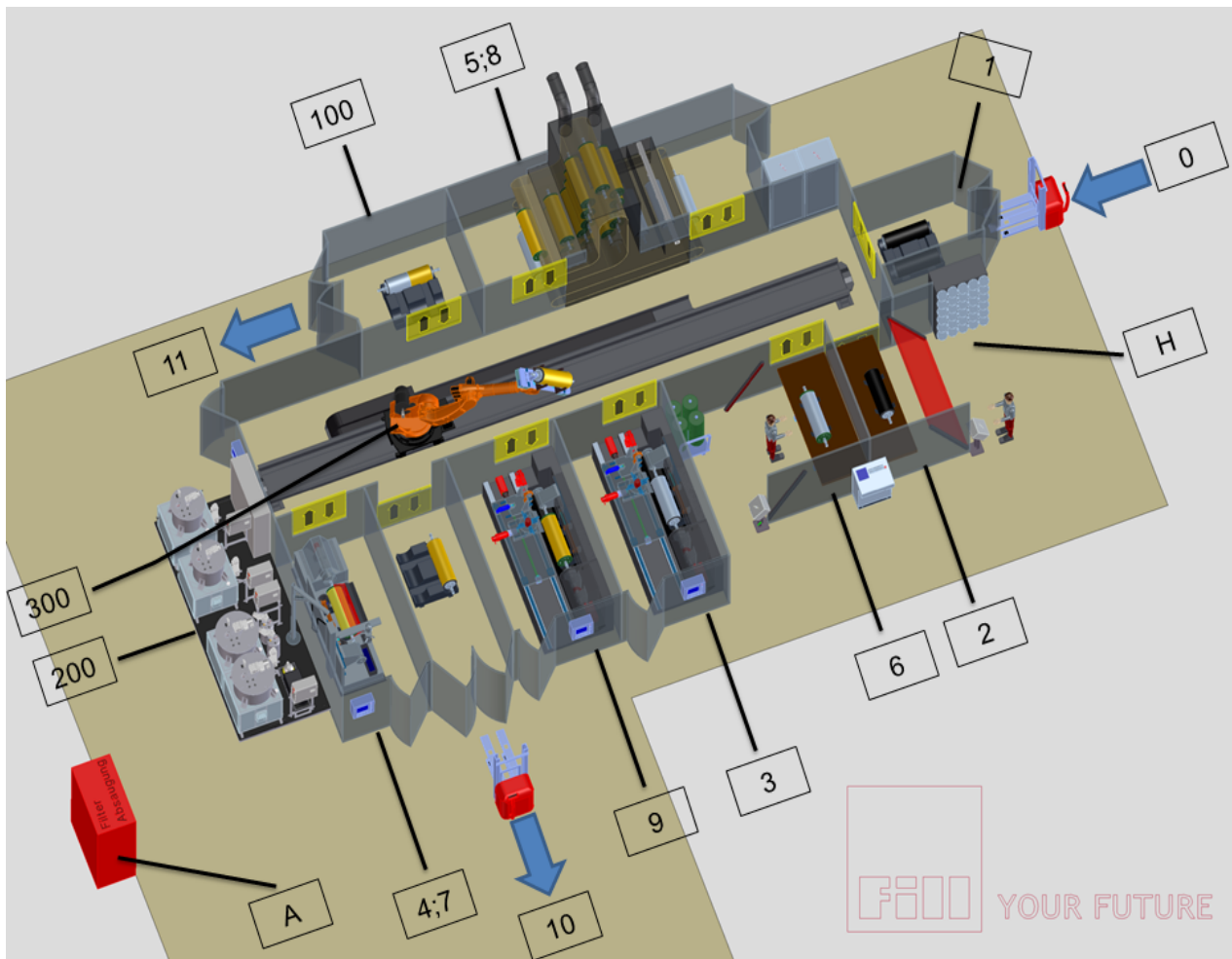


Abbildung 73: Sektion 5 bis 6 als 3D [FII 12]

Die Position **4** appliziert ohne menschliche Unterstützung die Oberfläche mit einem Haftvermittler. Bei diesem Prozess wird vor Auftrag des Haftvermittlers die FK-Oberfläche mit IR-Strahlern auf 60 °C vorgeheizt. Um den Ablüftvorgang des Haftvermittlers zu beschleunigen, wird der Rohling vom Roboter im Durchlaufofen in die untere Position **5** verbracht, wo der Haftvermittler bei circa 90 °C aktiviert wird. In weiterer Folge wird das Bauteil in Position **6** verbracht, um manuell beidseitig die Vorlaufstrecken aus Lager **H** für die PUR-Beschichtung anzubringen. Nach Freigabe durch den Werker transportiert der Roboter das Bauteil wieder auf die

Beschichtungsstation **7**, hier erfolgt der PUR-Auftrag. Unmittelbar nach dem Beschichten wird das Halbzeug in den Temperofen **8** gebracht, von wo aus der technologisch notwendige Temperprozess für den PUR-Bezug erfolgt. Nach Ablauf der Temperphase wird in Position **9** der PUR-Bezug überschleift. Ebenfalls überschleift wird hierbei die noch angebrachte Vorlaufstrecke der Beschichtung. Nach erfolgtem Überschleifen kann das Bauteil in die Entnahmeschleuse **10** übergeben werden. Auch hier wird in Zweierpacks gearbeitet. Die Entnahme erfolgt manuell. Im Falle einer Abweichung, diese wird von den autarken Maschinen selbst gemeldet oder vom Werker über ein am Arbeitsplatz befindliches Systempanel, überführt der Roboter das als defekt gemeldete Bauteil in die Position **100**. Hier kann dieses über die Schleuse **11** entnommen werden. Prozesstechnisch sind zwei Walzen zu einem Set zusammengefasst. Das System kommt aber ins Stocken, wenn die Schleusen nicht versorgt werden, entweder mit Rohlingen, die zum Beschichten gehen, mit der Entnahme von final bearbeiteten Walzen oder der Abfuhr von defekten Halbzeugen. Da diese Versorgungsprozesse manueller Natur sind, übernimmt der Werker hier eine essenzielle Aufgabe für den effektiven Ablauf der Sektion. Ein weiteres Merkmal ist, dass bei den manuellen Arbeitsplätzen, da diese in Reihe der Bearbeitung geschaltet sind, visuelle Systeme angebracht sind, die dem Werker eine ständig aktuelle Information über die Bearbeitungssituation geben. So erhält er unter anderem eine Rückinformation über die erlaubte mögliche zeitliche Länge der ihm zur Verfügung stehenden aktuellen Bearbeitungszeit. Der Werker wird informationstechnisch komplett in das Gesamtsystem eingebunden.

Der Informationstechnik kommt hier eine sehr wichtige Bedeutung zu. Es darf davon ausgegangen werden, dass es bei einzelnen Prozessen des Öfteren zu Verzögerungen kommen kann. Als Beispiel kann exemplarisch die Montage der Vorlaufstrecken angeführt werden. Da die Elemente hierfür im regenerativen Kreislauf fahren, kann es erfahrungsgemäß, insbesondere bei ständiger Benutzung, zu einer aufwendigeren Montage kommen. Dies muss durch die Logik der Versorgungssicherheit der einzelnen Stationen abgefangen werden.

Dem Sicherheitspaket der Anlage (Linie) kommt eine hohe Bedeutung zu. Beim Öffnen einer Schleuse darf der Roboter diese nicht mehr bedienen, was im Extremfall zu einer Prozessstörung führt. Ähnlich ist es, wenn in den Positionen **2** und **6** ein Werker an der Maschine steht oder arbeitet, der Roboter aus Sicherheitsrestriktionen nicht eingreifen darf. Ebenso wird es vorkommen, dass auch bei laufendem Prozess kurzzeitige manuelle Eingriffe an den autonomen Positionen vorgenommen werden müssen, als Beispiel kann ein verstopfter Mischkopf angeführt werden. Das System hat dies unter Beachtung der Sicherheitstechnik zu akzeptieren. Ebenso sind die entstehenden Dämpfe und Stäube am Ort des Entstehens abzusaugen. Hierzu wird eine zentrale Anlage **A** verwendet. Bei dem verwendeten Roboter handelt es sich um eine Sechs-Achsen-Maschine. Der Roboter wird an eine Linearachse montiert, welche die Bewegung des Automaten selbst mit maximal 30 m/min ermöglicht. Die maximale Reichweite ist auf 3.100 mm beschränkt. Das maximale Hebegewicht des Greifers liegt bei 230 kg.

6.2.2.4 Sektion 7

Die final beschichteten Bauteile werden in Sektion 7 kontrolliert, gewuchtet und dem Versand übergeben, vgl. Abbildung 74.

Die herzustellenden Bauteile werden über Einarmkrananlagen manuell auf die Wuchtmaschine **1** verbracht. Das Spannen der Bauteile erfolgt ohne Hilfszapfen, dies aus zwei Gründen: a) Erstens soll der Einfluss von Hilfsvorrichtungen beim Wuchten eliminiert werden, b) zweitens soll der Zeitaufwand für diese Tätigkeit minimal gehalten werden. Daher wird der zu wuchtende Körper direkt in der Lagerstelle aufgenommen. Die Vorrichtung ist hierzu fest in der Wuchtmaschine verbaut. Der Rüstprozess ist mittels Schnellspannvorrichtungen in nur wenigen Sekunden

abgeschlossen. Ein Shuttle 3 transportiert die Bauteile in die folgende Arbeitsstation **Verpacken und Versand**. Bevor die Teile final verpackt werden (4), erfolgt noch eine vorgeschaltete Endkontrolle, idealerweise direkt auf der Wuchtmaschine selbst. Alle von außen erkennbaren Funktionsmaße werden hier nochmals geprüft. Das sind hauptsächlich metrische Maße, wie Außendurchmesser, Länge der beschichteten Oberfläche, der Lagerabstand sowie optische Eigenschaften, wie Blasen- und Schlierenfreiheit des Bezuges, als auch das optische Gesamtbild. Abweichende Bauteile werden im Sperrlager 2 abgelegt und mannos abtransportiert. Final werden die Verpackungseinheiten über das Shuttle 5 bewegt.

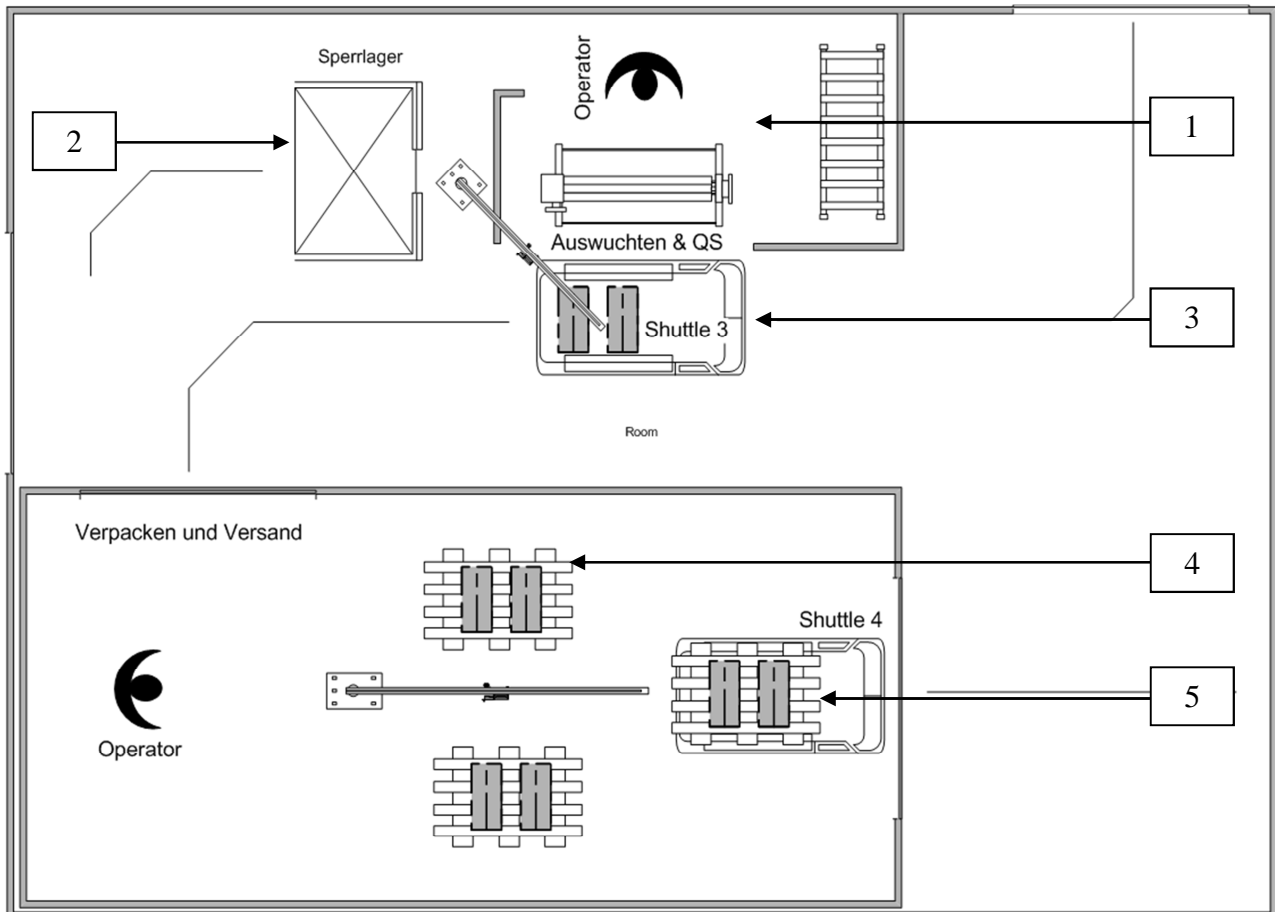


Abbildung 74: Sektion 7 Versand

Nacharbeit

In der Sektion 4 bis 7 sind Qualitätsstationen eingerichtet, welche es erlauben, ein Bauteil aus dem Herstellungsprozess zu nehmen. Anhand einer Fehlerliste werden die Abweichungen entsprechend gruppiert. Aus den Erfahrungen der Testserie kann festgestellt werden, dass es bei der Summe von Fehlern möglich ist, diese wirtschaftlich nachzuarbeiten. Einige wenige Ausnahmen, zum Beispiel Fehler bei zu kurzem Ablängen der Segmente oder beim Fügen der Keels, führen tatsächlich zu einem wirtschaftlichen Totalschaden (Nacharbeitskosten übersteigen den Wert des Bauteils).

Flächenbedarf Leaner Prozess, Sektion 1 bis 7

In Summe hat die Produktionslinie somit ein Flächenbedarf von 4.008 m². Im Vergleich hierzu der konventionelle Prozess benötigt 4.160 m². Allerdings ist es so, dass ein Teil der Herstellung beim konventionellen Prozess ausgelagert ist. Dies betrifft vorrangig die Anpassung der Keels auf das Passmaß. Den größten Platzbedarf hat somit die Laminatherstellung in der Sektion 1 bis 3. Das zu

produzierende FKV-Bauteil wird während der Herstellung, im Vergleich zum konventionellen Prozess, die Fertigungslinie nicht verlassen. Weiterhin durchläuft das Bauteil planmäßig jede Sektion nur einmal.

Qualitätsstufen Leaner Prozess

Um das Ziel der minimalen Materialbestände im Prozess zu erreichen, ist es unabdingbar, dass nur verwendbare Teile an die nachgelagerten Sektionen weitergegeben werden. Dies setzt voraus, dass die Produktqualität ständig kontrolliert wird. Aufgrund der Komplexität der Vorgänge sind Stichproben alleine nicht ausreichend. Grundlage hierfür ist, dass alle Mitarbeiter von Produktion und Fertigungslogistik entsprechend geschult und für mögliche auftretende Fehler sensibilisiert sind. Die anzuwendende Methode hierfür wird als Total-Quality-Management (TQM) bezeichnet.

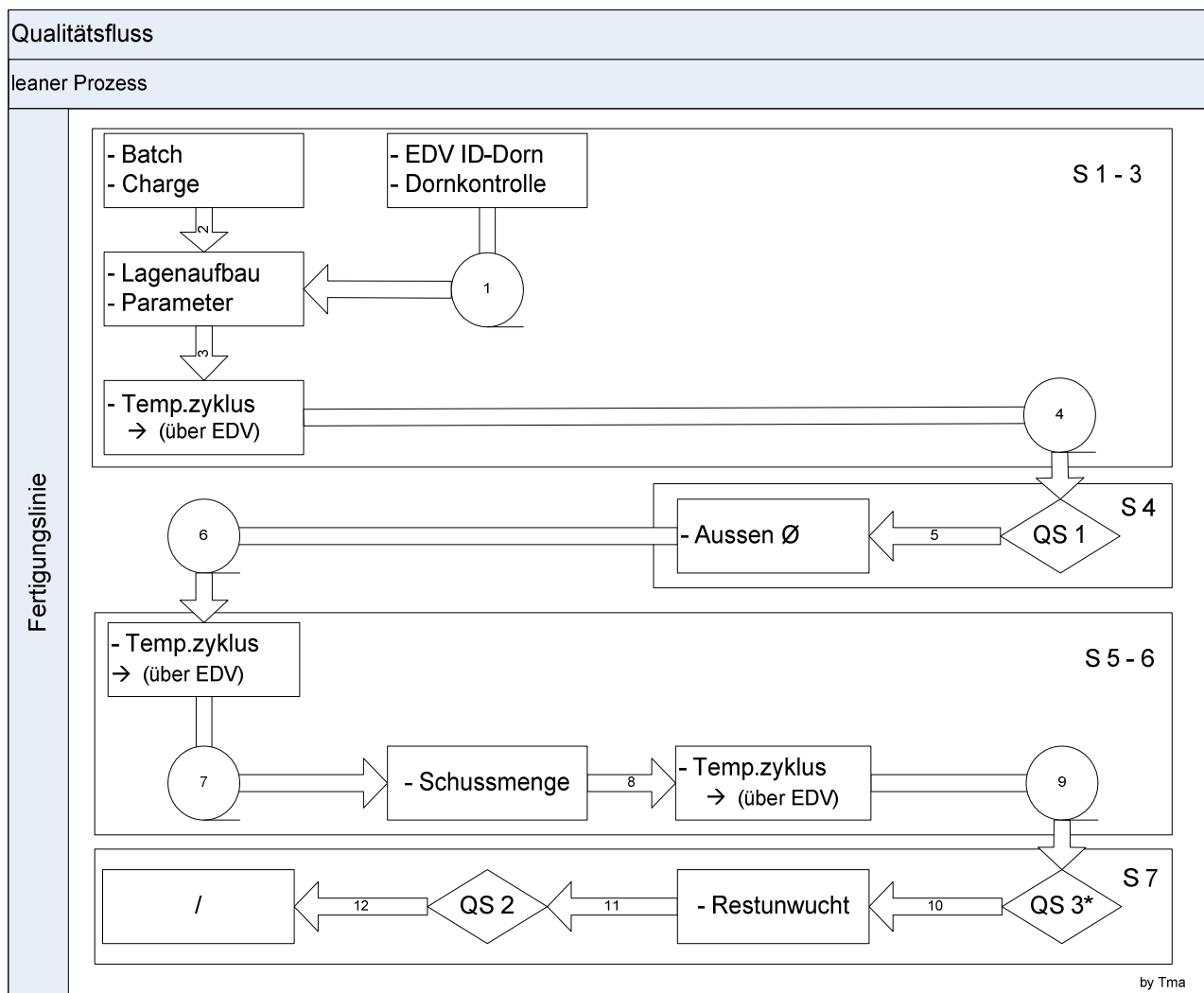


Abbildung 75: Qualitätsstufen im Leanen Prozess

Abbildung 75 zeigt die Qualitätsstufen im Leanen Prozess auf. Im Vergleich zum konventionellen Ablauf wurden diese auf ein notwendiges Maß reduziert. Der Lagenaufbau **S 1 bis 3**, die Parameter im Filament-Winding-Bereich sowie die Temperprogramme werden vom Prozess selbst überwacht und benötigen nicht die manuelle Kontrolle. Das System meldet Abweichungen hier autonom und ist Teil der Regelkette. Die Länge vom Faserverbundrohr **S 4** wird bereits während des Einstechens erfasst und selbstständig von der Maschine protokolliert. Der Außendurchmesser wird registriert, weil dieser in Verbindung mit dem Wickelaufbau Rückschlüsse auf den

Faservolumengehalt zulässt. Die Schussmenge **S 5 bis 6** gibt bei definierter Rotationsdrehzahl und Vorschub die Relation zum notwendigen Durchmesser wieder. Auf eine Prüfung der Zulieferqualität wird verzichtet, da die Zulieferkette qualifiziert und unterjährig separat kontrolliert wird. Im Vergleich zum konventionellen Prozess kommt aber noch ein **QS 3** in **S 7** zum Einsatz. Hier wird das Produkt gleich auf der Wuchtmaschine in Bezug auf optische Mängel vom Beschichtungsbereich kontrolliert. Es hat sich aus gängiger Erfahrung im konventionellen Prozess gezeigt, dass von vorgeschalteten Prozessen induzierte Fehler erkannt und eliminiert werden können, welche sonst den späteren Einsatz verhindern würden.

Materialfluss Leaner Prozess

Im Vergleich zum konventionellen Prozess sieht die leane Anordnung des Materialflusses aus wie in Abbildung 76 dargestellt.

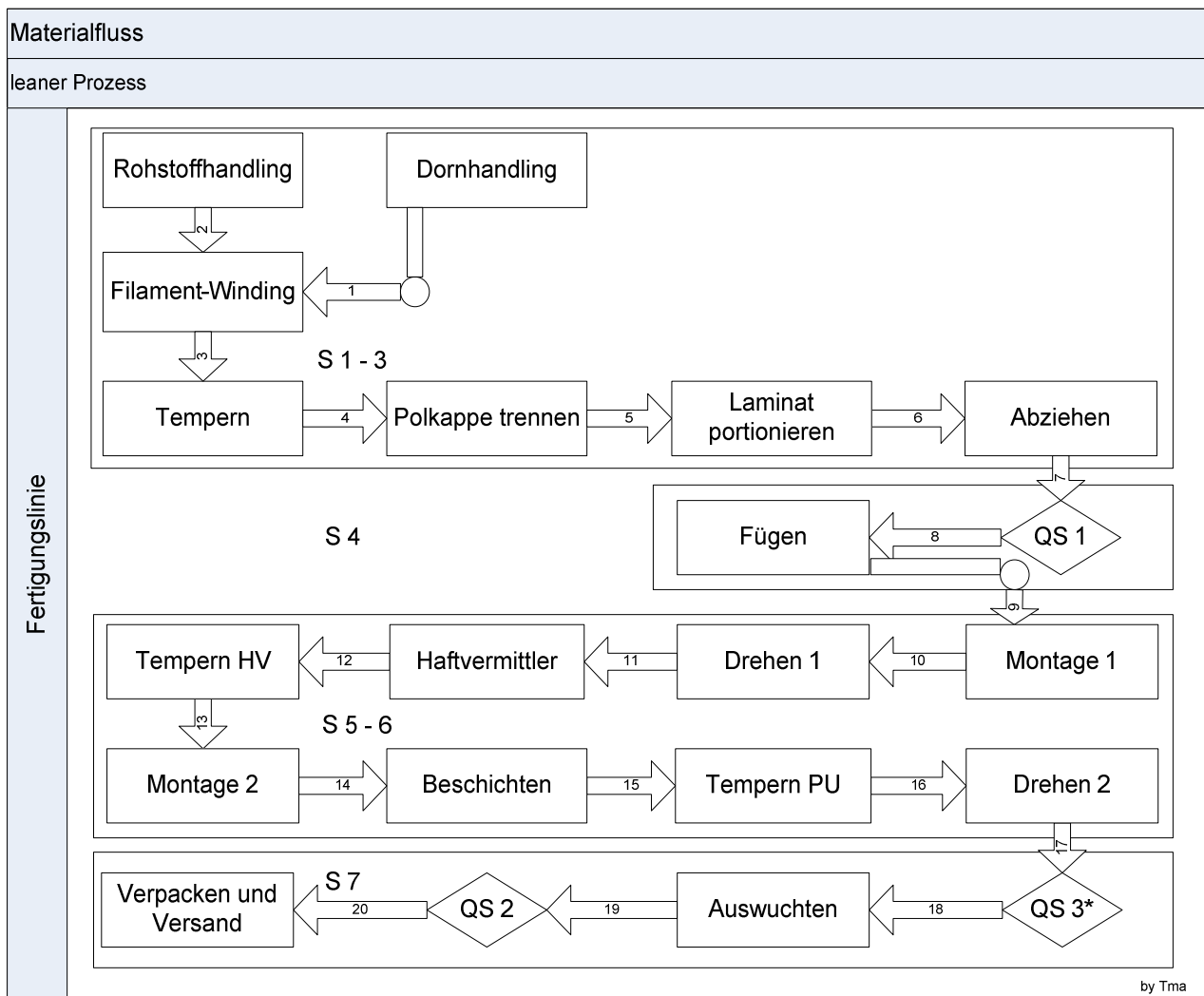


Abbildung 76: Materialfluss im Leanen Prozess

Der Materialfluss, vgl. Abbildung 76, ist sektionsbezogen aufgeführt. Aufgrund der Prozessoptimierung wird der Filament-Winding-Bereich nur einmal durchfahren. Es erfolgt somit, im Vergleich zum konventionellen Prozess, keine rückwärtsgerichtete Bewegung mehr. Weiterhin ist der gesamte Prozess räumlich nicht mehr getrennt. Dies hat in der Konsequenz zur Folge, dass Transportzeiten, die nicht wertschöpfend sind, eliminiert werden. Die Bereiche sind inhaltlich zusammengefasst, wie in der Sektion **S 1-3** wo das Composite-Halbzeug (Rohr) erzeugt wird, in

der Sektion **S 4** findet die „Hochzeit“ mit dem Krafteinleitungselement statt. In dem darauf folgenden Arbeitsbereich **S 5-6** wird der Bezug appliziert und konfektioniert. Im letzten Bereich **S 7** wird das Halbzeug gewuchtet und bereits für den Versand vorbereitet. Eine in Reihe geschaltete Fertigungslinie weist aber die Gefahr auf, dass Störungen unmittelbar zu einem verringerten Output führen, respektive übt es sofort eine Wechselwirkung auf benachbarte Zonen aus. Um dies zu vermeiden, wurden im Untersuchungsbeispiel beim Materialfluss Entnahme- sowie Speicherpositionen vorgesehen, diese sind in der Lage, das Atmen des Takts auszugleichen. Solche Pufferkapazität erlauben zugleich, dass Werker an verschiedenen Arbeitsplätzen innerhalb einer Schicht tätig sein können.

Abwicklungszeiten im Leanen Prozess

Abwicklungs- oder Handlingzeiten beschreiben Tätigkeiten, die zur Ausführung des unmittelbaren oder meist nächsten Arbeitsschrittes notwendig, aber nicht unmittelbar wertschöpfend sind, somit gemäß den Regeln des TPS in den Bereich der Verschwendung gehören. Streng genommen werden hierbei zwei Regeln tangiert: a) überflüssige Bewegungen sowie b) Transporte. Die Tabelle 27 unter Kapitel 9 gibt die von der Firma Fill GmbH in Oberösterreich ermittelten Zeiten wieder. Die Zeiten im konventionellen Prozess wurden anhand von Zeitrückmeldungen erfasst, die Zeitprognosen im Leanen Prozess sind aufgrund von Bewegungsgleichungen [Fil 12] theoretisch ermittelt worden. Die in der Tabelle 27 angegebenen Zeiten sind auf eine Dezimale gerundet. In Konsequenz bedeutet es, dass zwischen dem konventionellen und dem Leanen Prozess, in Bezug auf das Handling, ein Verhältnis von 479/105 entsteht. Zu beachten ist aber, dass der Leane Prozess im Handling nahezu keine menschliche Unterstützung benötigt. Somit kann festgehalten werden, dass alleine im Handling sechs Personen mit der Ausführung monotoner Tätigkeiten eingespart werden. Dies unterstreicht die Philosophie des Toyota-Produktionssystems, Menschen nur mit anspruchsvollen und verantwortungsreichen Tätigkeiten zu betrauen. Durch das Übertragen von Verantwortung wird zudem das Grundbedürfnis des Menschen nach Achtung und Anerkennung erfüllt [Maa 08]. Weiterhin reduziert es die Kosten und trägt somit zu einer höheren Akzeptanz bei den Abnehmern bei.

Beschaffung Keel (lean)

Im konventionellen Prozess werden alle Keels individuell und extern auf das jeweilige FKV-Rohr angepasst. Dieser Prozess ist zeit- und kostenaufwendig. Eine Untersuchung zeigte auf, dass dieser externe Schritt umgangen werden kann. Im Vergleich zum konventionellen Prozess verzichtet die leane Abarbeitung komplett auf die Verwendung von Klebstoff, um die Keels an der FK-Innenschale zu befestigen. Dies bedeutet, dass auf die Verwendung von Abreißgewebe auf dem Wickelwerkzeug komplett verzichtet werden kann. Für den Presssitz ist eine geometrisch exakt definierte Innenkontur ein notwendiges Kriterium. In der Untersuchung wurden alle Werkzeuge stochastisch verwendet. Für die Statistik wurden sieben Wickelwerkzeuge verwendet, welche sich in Durchmesser und Länge unterschieden. Zusammengefasst ergab diese Untersuchung 21 unterschiedliche Passmaßgruppen, hierbei konnten 48% in vier dominante Gruppen eingeteilt werden, vgl. hierzu Abbildung 111 im Anhang. Die Streuung der Passmaße resultiert aus drei Faktoren, die entsprechend ihrer Bedeutung aufgelistet sind:

- Außendurchmesser Wickelwerkzeug
- Applikation Abreißgewebe
- Faservolumengehalt, Raum- und Umgebungstemperatur.

6.3 Kostenanalyse

Im Folgenden wird nun die Kostensituation der beiden technologischen Prozessarten gegenübergestellt, siehe Abbildung 77. Es wurde ein theoretischer Invest im Leanen Prozess von 4,4 M€ ermittelt. Für die Fertigungshalle selbst sind keine nennenswerten Änderungen notwendig. Regionalbedingte zusätzliche Auflagen an Sicherheitstechnik wurden nicht berücksichtigt. Im Vergleich der Aufwendungen zum konventionellen Prozess werden 0,8 M€ zusätzlich benötigt. Die Abschreibungszeit der Anlagen wurde aufgrund der Dynamik des Geschäftsfeldes mit nur 6 Jahren festgelegt, da der Untersuchungsgegenstand im Bereich **RE** nur mittelfristig überschaubar ist. Das gerechnete Bauteil ist sehr materialintensiv, zeigt aber trotzdem deutliche Potenziale bei der Anwendung der Leanen Grundsätze auf.

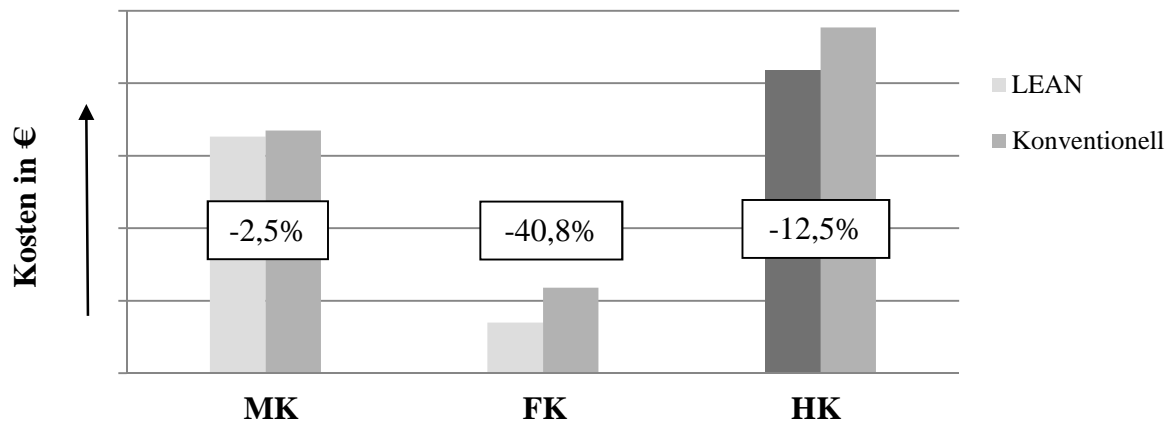


Abbildung 77: Kostenarten im Vergleich [TMa 11]

Der berechnete Platzbedarf beträgt 4.008m², das sind 179m² weniger als im konventionellen Prozess. Der Personalbedarf wurde mit 12,9 zu 43,2 Mitarbeitern im konventionellen Prozess berechnet. Hieraus resultiert eine Einsparung im Jahr von 70 % an direkten Personalkosten. Oder in absoluten Zahlen ausgedrückt. 708 t€ zu 2.375 t€im konventionellen Prozess. Hierfür ist hauptsächlich der Sachverhalt verantwortlich, dass die Automatisierung, besonders in den Sektionen 5 bis 6, nennenswert angepasst wurde. Der Anteil an unproduktiven Arbeiten, also Tätigkeiten, die gemäß dem japanischen Leanen Ansatz nicht unmittelbar wertschöpfend sind, wurden auf 22 % in Summe in Relation zum konventionellen Prozess reduziert. Selbst die externen Kosten konnten dadurch minimiert werden, dass zweistufige Prozesse, zum Beispiel das Filament-Winding oder die Beschaffung der metallischen Elemente, durch einstufige Vorgänge ersetzt werden konnten. Auch sind in der Untersuchung die Energiekosten dadurch reduziert worden, dass energetisch aufwendige Prozesse entschärft installiert wurden. Einer der größten Energieverbraucher sind im konventionellen Prozess die drei Temperöfen für die gewickelten Lamine, welche in Wiederholung ständig die komplette Heizkurve abfahren und im Anschluss komplett geöffnet werden. Diese Einrichtungen wurden durch isotherme Durchlauföfen ersetzt, welche in den einzelnen Temperaturzonen in sich geschlossen bei konstanter Temperatur arbeiten. Analog gilt dies auch für den Temperprozess des PUR-Bezugs. Darüber hinaus werden die Öfen für das Laminat als auch für das PUR einer doppelten Verwendung dadurch zugeführt, dass einmal der Wickelkern auf konstante Arbeitstemperatur gebracht wird, dies ist notwendig für prozesstechnische Randbedingungen wie der Faservolumengehalt als auch den Schrumpf und somit das Passmaß der Keels, zum anderen das FKV-Halbzeug zum Austempeln des Haftvermittlers benutzt wird. In Summe reduzieren sich die Herstellkosten der Walze um 12 % auf HK-Basis. Wäre aber der Markt bereit, den ursprünglichen Preis weiter zu tragen, könnte der Gewinnzuschlag auf 36 %, statt auf die ursprünglich frei gewählten 20 %, gesteigert werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die hohen Fertigungskosten bei der Herstellung von Faserverbundbauteilen im Allgemeinen, bei funktionsintegrierenden Leichtbaustrukturen im Faserwickelverfahren im Speziellen erfordern bei steigender Nachfrage auch bei verhältnismäßig geringen Stückzahlen die Anwendung von Leanen Arbeitsweisen. In den meisten Fällen lässt sich der Anteil der Materialkosten wenig bis gar nicht beeinflussen, jedoch sehr wohl die Fertigungskosten. Mit dieser Untersuchung wird der Forderung Rechnung getragen, die Prozesskosten bei der Herstellung von Faserverbundbauteilen zu reduzieren. In allen Fertigungsstätten, die während der Erstellung dieser Arbeit besucht wurden, werden die Bauteile im Filament-Winding-Verfahren in konventioneller Art und Weise hergestellt. Dies ist, ausgenommen Sonder- und Kleinserienbau, nicht mehr zeitgemäß. Zur Integration von ökonomisch angepassten Prozessen sind ganzheitliche Betrachtungsweisen der zum Teil sehr komplexen Wertschöpfungskette und die Synchronisierung der einzelnen Arbeitsschritte untereinander zwingend notwendig. Ein Paradigmenwechsel und die Anwendung effizienterer Arbeitsweisen bilden hierfür die Grundlage.

Im Mittelpunkt der vorliegenden Arbeit steht daher die durchgängige Untersuchung des Entwicklungs- und Herstellungsprozesses von einem serientauglichen Hochleistungsprozess mit hoher Komplexität. Es wurde aufgezeigt, dass der Einsatz von Automatisierung unter Verwendung von Robotik erhebliche Einsparung bringt und dies gilt nicht nur aus Kostensicht, sondern auch zur Sicherung einer gleichbleibenden Qualität. Ein weiterer Effekt ist, dass bei kleinerer Grundfläche ein höherer Ausstoß erzeugt wird und unter Einhaltung enger Prozessparameter vorhandene Fertigungsgrenzen deutlich erweitert werden können. Von hohem Stellenwert ist dabei die genaue Ablage der Fasern und insbesondere die Einhaltung der vorgegebenen Lagen-Wandstärken im letzten Drittel des Aufbaus. Denn diese tragen zum einen dazu bei, dass beim Schleifen zwangsweise in unterschiedlichen Schichten gearbeitet wird und zum anderen auch zum Erscheinen von Fehlstellen, die beim Beschichten mit hoher Wahrscheinlichkeit zum Auftreten von Blasen führen.

Mittels der durchgeführten analytischen Berechnungen konnten die Sensitivitäten dickwandiger Strukturen in Bezug auf hygrothermische Belastung nachgewiesen werden. Diese verursachen infolgedessen eine starke Verformungsbehinderung der dünnen Lagen gegeneinander, was zu einem komplexen dreidimensionalen Spannungszustand im Schichtverbund führt. Durch die Anwendung der analytischen Methode wurde der Abbau von thermischen Eigenspannungen durch Feuchteaufnahme bestätigt. Daraus folgt, dass CFK-Walzen vor ihrem industriellen Einsatz zunächst den betrieblichen Feuchtebedingungen ausgesetzt werden sollten.

Die komplexen Fertigungsprozesse bei FKV-Walzen eignen sich nicht für die von TAYLOR favorisierte Trennung zwischen Kopf- und Handarbeit. Versuchsergebnisse zeigten, dass das schnelle Anlernen von Fachkräften in Bezug auf die Prozesssicherheit zu Instabilität im Prozess führt. Zumindest verkettete FKV-Prozesse fordern die korrekte und verantwortliche Einbindung der Mitarbeiter nach dem Motto „Der Mensch macht es“. Es zeigt sich ferner, dass ein Übertragen eines Maximums an Aufgaben und Verantwortung in der Operator-Ebene in Kombination mit der Automatisierung das höchste Maß an Wertschöpfung einbringt. Dies führt im Umkehrschluss zu einem höheren Identifikationsgrad und somit zu einem maximalen Motivationslevel der Mitarbeiter. Weiterhin wurde die Bedeutung der Sozialkompetenz zwischen den Mitarbeitern untereinander und bis in die Managementebene hinein als wichtiger Baustein transparent. Es wird deutlich, dass die Förderung und die Erweiterung der Werkerverantwortung in der Ausführung und auch die Kontrolle ihrer Arbeiten für eine Optimierung der Prozesse dienlich ist. Dadurch erhält der Werker zwangsweise im System einen höheren Stellenwert, was dieser wiederum positiv durch

Engagement zurückgibt. Auch die Möglichkeit von Jobrotation hat eine positive Wirkung auf die Kosten, da freie Kapazitäten genutzt werden können und gleichzeitig der Wert des Operators für die Firma und somit für den Operator selbst steigt. Die isolierte Betrachtungsweise von einzelnen Bearbeitungsbereichen ist bei einer derartig starken Interaktion der Prozesse nicht zielführend.

Besonders kritisch ist ein Verstoß gegen das Just-in-time-Regelwerk zu bewerten. Zwangsweise baut das System zu hohe Bestände an halbfertigen Produkten als auch Rohstoffen auf, was zu ungeplanten Kosten, wie Lagerung, Transport und auch buchhalterischer Abwertung führt. Allein dieses Beispiel beinhaltet vier Verstöße gegen das Leane Toyota-Produktionssystem. Es fand eine Überproduktion statt, was dafür sorgte, dass die Produkte mithilfe von Transporten ausgelagert werden mussten und schließlich den Lagerbestand erhöhten. Die Einbettung der Leanen Grundsätze bei derart komplexen Leichtbaulösungen mit hoher Funktionsintegration, wie es die CFK-Walze verlangt, lässt sich lediglich durch die vollumfängliche Substitution der klassischen Arbeitsweise ermöglichen. Grundlage hierfür ist die Identifikation mit diesen neuartigen Ansätzen für die FKV-Industrie. Somit gibt nur das tiefe Verständnis über die Konstruktion, den Prozess und die Herstellung und dies bei möglichst durchgängiger Vorgehensweise dem System die Nahrung, um die maximale Wirtschaftlichkeit der CFK-Verbunde zu erschließen.

Als Quintessenz bestätigt die vorliegende Arbeit die von WOMACK, JONES & ROSS geäußerte Überzeugung (vgl. S. 38), dass „sich die Grundsätze der Schlanken Produktion in gleicher Weise in jeder Industriebranche der Erde anwenden lassen werden“. Das Lean Produktionssystem ist somit für die Herstellung von FKV-Hochleistungsbauteilen geeignet. Um die weitere Industrialisierung des CFK-Werkstoffes voranzutreiben, ist diese Metamorphose, soweit die Rahmenbedingungen dies zulassen, von der konventionellen in die Leane Arbeitsweise sehr wichtig. Die Arbeit zeigt auch Raum für weiteren Forschungsbedarf auf. Potentiale bieten insbesondere die mechanische Bearbeitung von FKV im prozessintegrativen und somit eng getakteten Umfeld auf.

8 Verzeichnisse

8.1 Literatur- und Quellenverzeichnis

- [AAR 96] Altenbach, J., Altenbach, H., Rikards, R.: Einführung in die Mechanik der Laminat- und Sandwichtragwerke, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Stuttgart, 1996
- [Akt 12] aktiencheck.de: Joint Venture EPG erhält Förderbescheid für Entwicklung von Hochleistungs-Precursor, www.aktiencheck.de, Internet, 2012
- [AVK 07] AVK – Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V., Produktion von faserverstärkten Kunststoffen in Europa 2006/2007, 10. Internationale AVK-Tagung, Stuttgart, 5./6. November 2007
- [AVK 09] AVK – Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V., Handbuch Faserverbundkunststoffe: Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen, Vieweg+Teubner Verlag, 2009
- [Bat 03] Bauernhansl, Th.: Bewertung von Synergiepotenzialen im Maschinenbau, Deutscher Universitäts-Verlag, 2003
- [Bav 94] Ballach, V.: Untersuchungen zur Entwicklung einer Klebverbindung zwischen rohrförmigen CFK-Formteilen und Krafteinleitungselementen aus Stahl, Diplomarbeit IKV-Aachen, 1994
- [BBO 07] Bauer, E., Brinkmann, S., Osswald, A., Schmachtenberg, E.: Kunststoff-Taschenbuch, 30. Auflage, Carl Hanser Verlag, 2007
- [Ber 01] Berning, R.: Grundlagen der Produktion, Cornelsen Verlag, Berlin, 2001
- [BHS 08] Biermann, D., Hufenbach, W., Seliger, G.: Serientaugliche Bearbeitung und Handhabung moderner faserverstärkter Hochleistungswerkstoffe, Untersuchungsbericht zum Forschungs- und Handlungsbedarf, 2008
- [Biz 12] frbiz: CarboTec, www.news.frbiz.com/voith_paper_carbotec_technology-330989.html, Internet, 2012
- [Brf 08] Brunner, F.: Japanische Erfolgskonzepte, Carl Hanser Verlag, 2008
- [Brm 03] Brökelmann, M: Dehnungsmessung mit Faser-Bragg-Gitter am Holmgurt der SB14 der Akaflieg Braunschweig im Flugversuch, 21. November 2003

- [Buj 05] Buchmüller, J.: Der Papiermacher, <http://buchmueller.com>, Internet, 2011
- [Bup 98] von Burg, P.: Moderne Schwungmassenspeicher, VDI-Vortrag 98
- [CSL 08] Bauteilspezifische Spulenlänge.: Offene Zusammenarbeit mit den Firmen Grafil und Toho Tenax zum Thema „angepasste Faservorratsbehältnisse“, 2008
- [Dpe 00] Drucker, P.: Die Kunst des Managements, Econ Verlag, 2000
- [DPV 97] Deutsch, V., Platte, M., Vogt, M.: Ultraschallprüfung, Springer Verlag, 1997
- [EHA 11] EHA Composite Machinery GmbH: Mit freundlicher Genehmigung, 2011
- [Ehg 06] Ehrenstein, G.: Faserverbundkunststoffe, Carl Hanser Verlag, 2006
- [Elh 10] Elsner, H.: Textiltechnologische Integration von Sensormodulen, LSE-GmbH, 2010
- [EnR 12] Alternative Energien und Rohstoffe: www.enro-portal.de, Internet, 2012
- [Erk 10] Erlach, K.: Wertstromdesign, Springer Verlag, 2010
- [ETH 10] IMES-ST: Festigkeit von FKV und Schadensanalyse, ETH Zürich Seite 5-20, 2010
- [FDa 08] Fuermann, T.: Dammasch, C.: Prozessmanagement, Hanser Verlag, 2008
- [Fio 03] Fischer, O.: Faserbruchgeschehen in kohlefaserverstärktem Kunststoff, IKV, 2003
- [Fit 05] Fischer, T.: Der Pressverband als torsionbelastete Krafteinleitung in Faser-Kunststoff-Verbund-Wellen, Shaker-Verlag, 2005
- [Fil 12] FILL GmbH: Zur Verfügung gestellte Berechnungen und Skizzen, 2012
- [FRP 08] Fuzz Reducing Program: Offene Zusammenarbeit und Erfahrungsaustausch mit verschiedenen Faserherstellern zum Thema Fuzz-Verminderung, die Firmen: Grafil, Mitsubishi Chemical, Zoltek, Tenax, 2008
- [Fun 96] Funck, R.: Entwicklung innovativer Fertigungstechniken zur Verarbeitung kontinuierlich faserverstärkter Thermoplaste im Wickelverfahren, VDI Verlag, 1996

- [FZR 95] Flemming, M., Ziegmann G., Roth.: Faserverbundbauweisen (Fasern und Matrices), Springer, 1995
- [FZR 99] Flemming, M., Ziegmann G., Roth.: Faserverbundbauweisen (Fertigungsverfahren), Springer, 1999
- [GAR 11] Wirtschaft Regional, Oktober Ausgabe Nummer 10, Wirtschaftszeitung für die Region Ostwürttemberg, 2011
- [Gel 08] Gelbrich, S.: Beitrag zur Entwicklung von Krafteinleitungselementen für hochbeanspruchte Faserverbund-Zugstreben im Bauwesen, Schriftreihe „Strukturleichtbau“, 2008
- [GHK 03] Geiger, Hering, Kummer: Kanban, Hanser Verlag München Wien, 2003
- [GKA 07] Gienke, H., Kämpf, R.: Handbuch Produktion: Innovatives Produktionsmanagement, Hanser Verlag, 2007
- [GNP 01] Gasch, R., Nordmann, R., Pfützner, H.: Rotordynamik, Springer Verlag, 2001
- [Gom 93] Goedel, M.: Möglichkeiten und Grenzen des Wickelns mit Infraroterwärmung Herstellung endlosfaserverstärkter Wickelbauteile mit thermoplastischem Werkstoff, ABK Band 17
- [Grn 09] Gronau, N.: Strategische und Programmentscheidungen in der Produktion, Vorlesungsunterlagen Uni Potsdam, 2009
- [GRT 07] Gramlich, D., Träger, M.: Herausforderungen einer zukunftsorientierten Unternehmenspolitik, Deutscher Universitätsverlag, 2007
- [Hct 12] Applied Materials Inc.: Drahtsägentechnologie, [www.appliedmaterials.com, \(/sites/default/files/Advanced-Wire-Sawing-Technology-Whitepaper_en.pdf\)](http://www.appliedmaterials.com/sites/default/files/Advanced-Wire-Sawing-Technology-Whitepaper_en.pdf), Internet, 2010
- [Hef 05] Henninger, F.H.: Beitrag zur Entwicklung neuartiger Fertigungsverfahren zur Herstellung von Bauteilen aus kontinuierlich faserverstärkten Thermoplasten, Dissertation, 2005
- [Heh 86] Heißen, H.: Verstärkte Kunststoffe in der Luft- und Raumfahrttechnik, Kohlhammer, 1986
- [Hel 08] Herbeck, L: Anforderung an eine Faserverbund Produktionstechnik; Vortrag in Braunschweig, 2008
- [Heo 06] Helms, O.: Konstruktion und technologische Umsetzung von hochbeanspruchten Lasteinleitungssystemen für neuartige Leichtbaustrukturen in Faserverbundbauweise, Dissertation TU Dresden, 2006

- [Hew 99] Hebeisen, W.: F. W. Taylor und der Taylorismus, vdf, Hochschulverlag an der ETH Zürich, 1999
- [HH 010] Hufenbach, W., Helms, O.: Leitfaden zum methodischen Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden, Leichtbau-Zentrum Sachsen GmbH, 2010
- [HHs 85] Hall, G. und Howell, S.: The Experience Curve from the Economist's Perspective, Strategic Management Journal, 6, S. 197-212, 1985
- [HKr 95] Hufenbach, W., Kroll, L.: Laminated cylindrical shells under mechanical and hygro-thermal loads, Advances in Engineering Software 23, 1995
- [HL 99] Hahn, D., Laßmann, G.: Produktionswirtschaft, Controlling industrieller Produktion, Physica-Verlag Heidelberg, 1999
- [HSA 10] HUBER+SUHNER AG, www.composites.ch/co-cfk, Internet, 2010
- [HSc 00] Harry, M.; Schroeder, R.: Six Sigma, Campus Verlag, 2000
- [IAS 04] IAS: Jahresbericht 2004, Berichtszeitraum 1.1.2004 bis 31.12.2004 der Technischen Universität Dresden, Institut für Akustik und Sprachkommunikation, 2004
- [Imm 02] Imai, M.: Kaizen, Der Schlüssel zum Erfolg, Econ Verlag, 2002
- [INO 12] Höhere Effizienz bei der Papierherstellung: http://www.inometa.de/fileadmin/user_upload/Broschueren, Internet, 2012
- [Int 12] Diverse Quellen: www.inometa.de, www.carbon-composites.eu/mitglieder, Internet, 2012
- [IPc 13] IP.com: Nutzung von gebrauchtem Slurry, www.ip.com, (/IPCOM/000136274), Internet, 2013
- [Jah 88] Jahn, H.: Erzeugnisqualität, die logische Folge von Arbeitsqualität, VDI-Z, 1988
- [JEC 07] N.N.: Ring around innovative winding, JEC Composite Magazine, Issue 35, pp 52-63
- [JMRS 06] John, A., Merane, R., Rosenpage, O., Staudter, C.: Six Sigma+Lean Toolset, Springer, 2006
- [KcK 07] Kostka C. & S.: Der Kontinuierliche Verbesserungsprozess, Hanser Verlag, 2007
- [Keh 09] Kerkhoff, H.J.: Vortrag Kerkhoff, Stahl-Zentrum Stahlinstitut VDEh, Wirtschaftsvereinigung Stahl, 2009

- [KHE 09] Kroll, L.; Heinrich, M.; Elsner, H.: Fertigungstechnologien für Piezomodule mit Drahtsensorik. In: Neugebauer, R. (Hrsg.): 2. Wissenschaftliches Symposium des SFB/Transregio 39, Großserienfähige Produktionstechnologien für leichtmetall- und faserverbundbasierte Komponenten mit integrierten Piezosensoren und -aktoren (S. 48-52), TU Chemnitz, 2009
- [Koh 05] Kormann, H.: Nachhaltige Kundenbindung, VDMA Verlag 2005
- [Kom 10] Köbl, Martin: Wafer-Fertigung, Industrie-Workshop Photovoltaik, 2010
- [Kra 97] Kranz, A.: Thermisch beschichtete CFK-Wellen im Maschinenbau, Die deutsche Bibliothek, 1997
- [Krl 05] Kroll, L.: Berechnung und technische Nutzung von anisotropiebedingten Werkstoff- und Struktureffekten für multifunktionale Leichtbauanwendungen, Habilitationsschrift TU Dresden, 2005
- [Krl 92] Kroll, L.: Zur Auslegung mehrschichtiger anisotroper Faserverbundstrukturen, Dissertation TU Clausthal, 1992
- [Küg 07] Küffner, G.: Von der Rolle des Papiers, Deutsche Verlags-Anstalt, München, 2007
- [Kut 10] Kumagai, T.: Vortrag zum 50jährigen Jubiläum zur Begründung der Partnerschaften der Firma Freudenberg mit japanischen Unternehmen, Weinheim a.d.B., <http://www.tkumagai.de/koen%20Freudenberg.html>, 2010
- [LE 10] Leibelt, J., Elsner, H.: Gestrickte Sensoren-Vielfältige Anwendungsmöglichkeiten, Elektronik Industrie, 2010
- [Lia 92] Lingener, A.: Auswuchten-Theorie und Praxis, Verlag Technik GmbH, 1992
- [Lis 07] Lippl, S.: Weiterentwicklung von Walzenbezugskomponenten für die Papierindustrie, Diplomarbeit Europa Fachhochschule Fresenius, 2007
- [log 12] Logomatic: Drahtsägentechnologie, Slurry, [www.logomatic.de \(/assets/plugindata/pool/flyer_diamond-wire_en.pdf\)](http://www.logomatic.de/assets/plugindata/pool/flyer_diamond-wire_en.pdf), Internet, 2012
- [Maa 08] Maslow, A.: Motivation und Persönlichkeit, Rowohlt Taschenbuch Verlag, 2008
- [Maa 10] Mafeld, A.: The Automation of Polymer Composites Manufacturing, Published by JEC, 2010
- [Mau 10] Maurer, J.: Deutschland automatisiert mit Elan, Germany Trade und Invest, 2010

- [Mih 07] Mintzberg, H.: Strategy Safari: Der Wegweiser durch den Dschungel des strategischen Managements, Redline Wirtschaft 2007
- [Mim 09] Milwich, M.: Faserverbundwerkstoffe Handbuch, Handbuch der Firma R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH, 2009
- [MJF 90] Möckel J., Fuhrmann, U.: Epoxidharze, Verlag moderne Industrie AG& Co., 1990
- [MKe 08] Menzl, K.: Strukturmechanische Auslegung von Hochleistungs-Papier-Walzen in CFK-Bauweise, Diplomarbeit TU Dresden, 2008
- [MS 09] Mathar, H.-J., Scheuring, Unternehmenslogistik, Compendio Bildungsmedien AG, 2009
- [MSc 09] May, C.; Schimek, P.: TPM, CETPM Publishing, 2009
- [MTA 13] MT Aerospace AG: Freigabe der Verwendung von Bilder und Datenblätter aus Kundenpräsentationen, Augsburg, 2013
- [Mud 00] Müller, D.: Das Hornkonzept, Dissertation Universität Stuttgart, 2000
- [Mug 93] Müllerferli, G.: Vergleich von radiologischen, zerstörungsfreien Prüfverfahren für Faserverbundkunststoffe, ABK Band 9, 1993
- [NM 04] Neitzel, M., Mitschang, P.: Handbuch Verbundwerkstoffe, Hanser Fachbuchverlag, 2004
- [Oeb 03] v. Oetinger, B.: Das Boston Consulting Group Strategie-Buch, Econ Verlag, 2003
- [Oht 93] Ohno, T.: Das Toyota-Produktionssystem, Campus Verlag, 1993
- [Pft 93] Pfeifer, T.: Qualitätsmanagement, Carl Hanser Verlag, 1993
- [PMT 03] ASPI, VAP: Papiermachertaschenbuch, Dr. Curt Haefner-Verlag GmbH Heidelberg, 2003
- [PMX 10] Performaxx Research GmbH: Research-Studie Meyer Burger Technologies AG, 2010
- [Pom 99] Porter, M.: Wettbewerbsvorteile: Spitzenleistungen erreichen und behaupten, Campus Verlag, 1999
- [POS 11] Polyscope: Sicherheitstechnik Automation, Ausgabe 18/11 S33, Internetseite der Binker Medien AG, <http://www.polyscope.ch>, 2011
- [Pua 95] Puck, A.: Festigkeitsanalysen von Faser-Matrix-Laminaten, Hanser Verlag, 1996

- [RBe 12] Roland Berger Strategy Consultants: Serienproduktion von hochfesten Faserverbundbauteilen, Perspektive, 2012
- [Rek 11] Reddig, K.: Manufacturing the Solar Future, Photovoltaics International, 2011
- [Rem 08] Reyne, M.: Verbundwerkstoff-Lösungen, JEC Publications, 2008
- [Ris 04] Riess, S.: Geometrieveränderungen von gewickelten CFK-Rohrstrukturen infolge des Warmhärtens, Studienarbeit TU Dresden, 2004
- [Roj 97] Romagna J.H.: Neue Strategien in der Faserwickeltechnik, Dissertation, 1997
- [Rom 08] Rockstedt, M.: Die Erfolgsstrategie von Toyota, Diplomica Verlag, 2008
- [Rot 08] Roberts, T.: The Carbon Fibre Industry Worldwide 2008-2014, MTP, 2008
- [Sca 07] Schlarb, A.: Verbundwerkstoffe mit Kunststoffmatrix im Automobilbau, Vortrag Material Innovativ, 2007
- [Sch 00] Schneider, H.: Auswuchttechnik, Springer Verlag, 2000
- [Sch 07] Schürmann, H.: Konstruieren mit Faser-Kunststoff Verbunden, Springer Verlag, 2007
- [Sch 08] Schürmann, H.: Praktikum Wickeltechnik der TU Darmstadt, 2008
- [Scs 05] Schöning, S.: Trends in der Automatisierung, Chance Robotik RWTH Aachen, 2005
- [Scs 12] Scholz, S.: Epoxidharzbasierte Nanokomposit-Schichten für mechanisch, tribologisch und medial belastete FKV, Dissertation TU-Chemnitz, 2012
- [Sev 10] Sonneninitiative e. V: <http://www.sonneninitiative.org>, Internet, 2010
- [SGL 11] Gespräche mit den Fachabteilungen der Firma SGL Carbon GmbH, Carbon Fibers & Composite Materials, 2011
- [SHN 10] Spieler, F.; Helbig, W.; Nendel, L.; Kroll, L.: Mit gestrecktem Faden, handling online; 2010
- [Sih 04] Simon, H.: „Think!“ Strategische Unternehmensführung statt Kurzfrist-Denke, Campus Verlag, 2004
- [Sih 07] Simon, H.: Hidden Champions des 21. Jahrhunderts, Campus Verlag, 2007

- [SIN 12] Siemens Insight: Innovation auf Draht, <http://www.automation.siemens.com>, Ausgabe 1-12, 2012
- [SIZ 12] Stahl-Informations-Zentrum: Kleben von Stahl und Edelstahl Rostfrei, Merkblatt 382, 2012
- [SKA 11] Schlösser & Cramer KG.; Produktkatalog, Internet, <http://www.schloesser-cramer.de/pages/katalog.pdf>, 2011
- [SKU 09] Scholz, S.; Kroll, L.; Ulke, L.: Mechanisches Verhalten mehrschichtiger Faserverbund-Hydraulikzylinder mit innerer Funktionsoberfläche, Tagungsband, Werkstofftechnisches Kolloquium, TU Chemnitz, 2009
- [Täo 12] Träger, O.: Kunststoffe und Faserverbundkunststoffe im Automobil – zukünftige Chancen und Herausforderungen, 12. Schwarzheider Kunststoffkolloquium, 2012
- [THT 11] TohoTenax, Faserspule, <http://www.tohotenax-eu.com>, Internet, 2011
- [Tip 09] Tichelmann, P.: Auslegung und Optimierung versatzausgleichender Bauelemente und ihrer Integration in eine Antriebswelle, Shaker Verlag, 2009
- [Tiw 02] Timischl, W.: Qualitätssicherung, Carl Hanser Verlag München, 2007
- [TMa 08] Maurer, T.: Untersuchung der Dynamik von biegeschlanken Leichtbauwalzen, Studienarbeit an der TU Dresden, 2008
- [TMa 09] Maurer, T.: Untersuchung zur Auslegung und Fertigung sowie zum Betriebsverhalten von Leichtbau-Streichgegenwalzen für die Papierherstellung, Diplomarbeit an der TU Dresden, 2009
- [TMa 11] Maurer, T.: Eigene Bilder, sowie Untersuchungen und Messungen, 2007 bis 2011
- [TMa 92] Maurer, T.: QS an Faserverbundrohren, Diplomarbeit an der FH Darmstadt, 1992
- [TS 11] Teeuwen, B.; Schaller, C.: 5S Die Erfolgsmethode zur Arbeitsplatzorganisation, CETPM Publishing, 2011
- [USD 10] U.S. Department of Energy: Low Cost Carbon Fibre Overview, 2010
- [USi 06] Uni Siegen: Klebeverbindungen, me-07, 2006
- [VDI 90] VDI-Gesellschaft Produktionstechnik: VDI-Richtlinie 2860, Beuth-Verlag, 1990
- [VEN 10] Ventizz Private Equity AG: Quo vadis Solarzulieferer, Hochschule RheinMain, 2010

-
- [VGe 85] von Gelhorn, E.: Die Fertigung von technischen Teilen im Wickelverfahren, Dissertation an der RWTH Aachen, 1985
- [Vow 10] Voß, W.: Der Photovoltaik-Standort in Deutschland – quo vadis?, Hans Böckler Stiftung, 2010
- [Win 11] Elektro-Maschinenbau Helmut Winter GmbH, A-2560 Neusiedl bei Berndorf, genehmigt durch C. Winter, 2011
- [WJo 04] Womack, J., Jones, D.: Lean Thinking, Campus Verlag, 2004
- [WTR 94] Womack, J., Jones, D., Ross, D.: Die zweite Revolution in der Automobilindustrie, Campus-Verlag, 1994
- [WWa 11] Waltritsch & Wachter GmbH: Mit freundlicher Genehmigung, 2011
- [XPE 11] xperion Energy & Environment GmbH, www.xperion-energy.de, Internet, 2011
- [Zef 91] Zeppernick, F.: Walzen eine runde Sache, GAK, 1991 – 2001
- [Zis 94] Zi, S.: Über die Kriegskunst, Verlag für Fremdsprachige Literatur, ISBN: 9787119044866, 1994
- [Zoh 10] Textiltechnologische hergestellte Sensorstrukturen zur Erfassung von Dehnung, SLK, 2010

8.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Typischer Aufbau einer Kohlenstofffaserwalze [Biz 12]	3
Abbildung 2: Faserverbund-Fertigungsverfahren [Hel 08], (Originalbild)	6
Abbildung 3: Verteilung nach AVK [AVK 07]	6
Abbildung 4: Preisentwicklung der C-Faser nach Produzenten und Jahren [TMa 11]	7
Abbildung 5: Aktuelle Produktionskosten der PAN-Faser [USD 10]	8
Abbildung 6: Veränderung der Rohstoffkosten im Vergleich über 10 Jahre [TMa 11]	9
Abbildung 7: Zusammensetzung des europäischen Producer Market [TMa 11]	12
Abbildung 8: Monokristalliner Ingot [Sev 10], a) Block vor dem Schnitt, b) nach dem Schnitt	13
Abbildung 9: Belastungszustand der DTS	15
Abbildung 10: Untersuchungsgegenstand mit Geometrie und Materialkennzeichnungen	15
Abbildung 11: DTS im Einsatz (EP08 08701A2)	16
Abbildung 12: Gegenüberstellung der Matrixviskositäten [TMa 11]	19
Abbildung 13: Laminataufbau Versuch VEB0090, 1. Wickeltag	21
Abbildung 14: Gewählte Temperkurve für die Untersuchungstypen [Ris 04]	22
Abbildung 15: Gemessener Glasübergangspunkt der verschiedenen Prüflinge	23
Abbildung 16: Erkennbare 45°-Schleiflage [TMa 11]	24
Abbildung 17: Aufbau eines MSV-Zylinders als mechanisches Ersatzbild	25
Abbildung 18: Normalspannungen nach Temperaturbelastung	27
Abbildung 19: Normalspannungen nach Temperaturbelastung und Konditionierung ($M_A = 1\%$) an der Stelle $l=500$	28
Abbildung 20: Verschiebung v nach Temperaturbelastung $T_A=120^\circ\text{C}$ mit und ohne Konditionierung ($M_A = 1\%$) an der Stelle $l=500$	28
Abbildung 21: Erfahrungskurve in Technologiebeherrschung [Bat 03]	31
Abbildung 22: Herstellungsprozess unterteilt nach Sektionen	36
Abbildung 23: Einflussgrößen im Wickelprozess [Roj 97], [TMa 11]	37
Abbildung 24: Typischer Fuzz im Umlenkbereich [FRP 08]	38
Abbildung 25: Roving-Umlenkung [FRP 08], a) Statische Umlenkung S , b) dynamische Umlenkung D	39
Abbildung 26: Einflussparameter Imprägnierbad [Roj 97], [TMa 11]	40
Abbildung 27: Rovingseparatoren RS, a) Mitlaufender RS [EHA 11], b) Stehender RS [FRP 08], c) Taillierter RS [FRP 08]	41
Abbildung 28: Kräftesituation an der Imprägnierwalze [Roj 97]	42
Abbildung 29: Versuchsaufzeichnung des Temperaturverlaufs über der Zeit [TMa 11]	43
Abbildung 30: Stachelwalze [EHA 11], a) Gesamtansicht, b) Detail	43
Abbildung 31: Leitorgane [FRP 08], a) Keramikauge/starr, b) Metallauge/starr, c) Variables Fadenführungssystem	44
Abbildung 32: Verlegekopf in verschiedenen Positionen [TMa 11], a) Verlegekopfstellung bei 12°-Wicklung, b) Verlegekopfstellung im Polbereich	45
Abbildung 33: Verwendeter Verlegekopf in Frontansicht [int 12]	45
Abbildung 34: Durchschnittliche Tapegeschwindigkeit pro Lage am Untersuchungslaminat [Tma 11]	47
Abbildung 35: Fasergehaltspunkte bei unterschiedlicher Fadenkraft	48
Abbildung 36: Bandspannungsregler	49
Abbildung 37: Appliziertes Abreißgewebe, a) Unterschiedliche Überlappung des AG, b) Fehlstellen des AG	50
Abbildung 38: FK-Fläche [TMA 11], a) Innenfläche ohne Abreißgewebe, b) Innenfläche mit Abreißgewebe, c) Grenzverhalten von H_2O zu FK	50
Abbildung 39: Aufnahme der Oberflächentemperatur über der Länge [TMa 11]	51
Abbildung 40: AST-Layer [TMa 11], a) während der Applikation, b) nach dem Härten	52

Abbildung 41: Gewählte Temperkurven für den Prozess 1 und 2 [TMa 11]	53
Abbildung 42: Einstechen und Portionieren [TMa 11], a) Einrichten auf der Großdrehbank, b) Ausführen des Trennschnittes	54
Abbildung 43: Funktionelle Skizze Keel mit Klebefläche [TMa 11]	55
Abbildung 44: Berechnung des Presssitzes sowie Situation Fügen [TMa 11]	55
Abbildung 45: Ausführungsform Keel, a) Variante 2 mit Klebetasche, b) Keel Variante 1 nur Presssitz	56
Abbildung 46: Qualitatives Fügedruckdiagramme nach [Fit 05], (Originalbild)	56
Abbildung 47: Einbausituation [TMa 11], a) idealer Zustand , b) mit Planschlag aber ohne Drahtfeld, c) mit Planschlag und Drahtfeld.....	57
Abbildung 48: Planschläge im konventionellen Fügeprozess, Testreihe [TMa 11]	58
Abbildung 49: Druckdiagramm beim Fügen der gekühlten Keels, Testserie [TMa 11]	58
Abbildung 50: Planschläge im optimierten Prozess, Testserie [TMa 11].....	59
Abbildung 51: Laminataufbau [TMa 11], a) 50 mm ausreichende gute Wickelstruktur, b) 15 mm stark vakuolenhaltige Wickelstruktur.....	61
Abbildung 52: GTS- Oberfläche [TMa 11], a) und b) mit Knitterfehler, c) mit Imprägnierfehler .	62
Abbildung 53: CFK-Oberfläche [TMa 11], a) Fehlerbehaftet, b) Ideal für den Beschichtungsprozess.....	62
Abbildung 54: a) Fehler in der 12°-Lage, b) Fehler als trockener Bereiche [TMa 11]	63
Abbildung 55: Bruchbild an der Grenzfläche FK zu PUR [TMa 11], a) Optimales bei einer 45°- Oberfläche, b) Suboptimales bei einer 12°-Oberfläche	63
Abbildung 56: Oberflächenbearbeitung [TMa 11], a) Drehmaschine mit DTS , b) Schleifspindel mit Halter im Einsatz.....	64
Abbildung 57: Rändelbild Seitenscheibe [TMa 11], a) mit Maßangabe, b) in Nahaufnahme.....	64
Abbildung 58: Beurteilung der Randhaftung in Abhängigkeit der Lagerzeit [TMa 11]	65
Abbildung 59: FK-Oberfläche [TMa 11], a) vor dem Haftvermittlerauftrag mit Fehlstelle F, b) nach dem Haftvermittlerauftrag	67
Abbildung 60: Infrarot-Aufnahme [TMa 11], a) IR-Kurve Beschichtung in Prozess, b) IR- Beschichtung final.....	68
Abbildung 61: Vordrehen der PUR-Oberfläche [TMa 11]	69
Abbildung 62: Situation Auswuchtanlage [Win 11], a) Axiale Verspannung, b) Auswuchten in Einspannsituation	70
Abbildung 63: Fehlersituation nach JAHN [Jah 88], (Originalbild)	71
Abbildung 64: Zehnerregel der Fehlerkosten nach Pfeifer [Pft 93], (Originalbild)	72
Abbildung 65: QS-Fluss im konventionellen Prozess	73
Abbildung 66: Materialfluss im konventionellen Prozess	76
Abbildung 67: Verteilung der Kostenarten	78
Abbildung 68: Taktzeiten der Produktionslinie [TMa 11].....	79
Abbildung 69: Qualitative Nachkalkulation der ersten Untersuchungstypen [TMa 11]	81
Abbildung 70: Aufgenommene Fehlerhäufigkeit [TMa 11].....	82
Abbildung 71: Sektion 1 bis 3.....	88
Abbildung 72: Sektion 4 Fügen	89
Abbildung 73: Sektion 5 bis 6 als 3D [Fl 12]	90
Abbildung 74: Sektion 7 Versand	92
Abbildung 75: Qualitätsstufen im Leanen Prozess	93
Abbildung 76: Materialfluss im Leanen Prozess	94
Abbildung 77: Kostenarten im Vergleich [TMa 11].....	96
Abbildung 78: Preisentwicklung, a) Prognose Entwicklung der C-Faser-Preise [Bup 98], b) Prognose Entwicklung der C-Faser-Preise [Sca 07]	113
Abbildung 79: Abhängigkeit des Acrylnitrils vom Rohölpreis [TMa 11].....	114

Abbildung 80: Kapazität und Prognose [TMa 11], a) Kapazität zu Verbrauch C-Faser, b) Entwicklung und Prognose der weltweiten Ölförderung	115
Abbildung 81: Herstellungstemperaturen der unterschiedlichen Fasertypen [AVK 09]	116
Abbildung 82: Veränderung der Rohstoffkosten über 10 Jahre [TMa 11]	116
Abbildung 83: Kohlenstofffaserkapazitätsaufbau Heavy Tow weltweit [TMa 11]	117
Abbildung 84: Produktlebenszyklus nach GRONAU [Grn 09], (Originalbild)	118
Abbildung 85: Dehnung unter Temperatureinfluss	122
Abbildung 86: Dehnung unter Temperatureinfluss und Feuchte	122
Abbildung 87: DSC-Kurve eines EP-Harzes, (Originalbild)	123
Abbildung 88: Verlauf des Aushärtegrades, (Originalbild)	123
Abbildung 89: Rohstofflager (Sektion 1)	124
Abbildung 90: Funktionsskizze Wickelmaschine (Quelle: Kuzmany und [TMa 11])	125
Abbildung 91: Kohlenfaserspule mit Pappträger [THT 11]	125
Abbildung 92: Fadenführung im nassen Bereich [EHA 11]	126
Abbildung 93: Verlegekopf [WWa 11], a) mit starrer Führung, b) Verlegekopf mit Rollenführung, (Originalbild)	126
Abbildung 94: Beispiel: Krafteinleitung mit Verbolzen/Marine	127
Abbildung 95: Beispiel: Krafteinleitung mit Verbolzen/Aerospace	127
Abbildung 96: Beispiel: Krafteinleitung über Presssitz	127
Abbildung 97: Fügevorrichtung, (Originalbild)	128
Abbildung 98: Verschleißpartner	129
Abbildung 99: Vorbereiten Beschichtung [TMa 11], a) FK-Oberfläche reinigen, b) Auftrag des Haftvermittlers	130
Abbildung 100: Beschichtung [TMa 11], a) Beschichtungskopf mit Breitschlitzdüse, b) Beschichtungssituation	130
Abbildung 101: RFID [TMa 11], a) RFID positioniert, b) RFID in Ableseposition	131
Abbildung 102: Frischwassertank vom Typ PC 215 A/B [MTA 13]	131
Abbildung 103: Fertigungsstätte 1 [TMa 11]	132
Abbildung 104: Fertigungsstätte 2 [TMa 11]	133
Abbildung 105: Belegungsdaten im konventionellen Prozess [TMa 11]	135
Abbildung 106: Abwicklungszeiten im konventionellen Prozess [TMa 11]	135
Abbildung 107: Personalkosten pro Jahr zur Abwicklung [TMa 11]	136
Abbildung 108: Wuchtzustand vor und nach dem Auswuchten	137
Abbildung 109: Bau von gleichartigen Flugzeugen	137
Abbildung 110: Deming-Rad nach Hutwelker	137
Abbildung 111: Verteilung Außendurchmesser Keel [TMa 11]	138
Abbildung 112: Veränderung der Benzinpreise der letzten Jahre [TMa 11]	139
Abbildung 113: Beispiel einer automatisierten Zylinder-Produktion [EHA 11]	140

8.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Strategisches Produktionsziel [GKA 07]	4
Tabelle 2: SWOT-Analyse [BHS 08]	11
Tabelle 3: Frei definierte Geometriedefinition der untersuchten Type.....	14
Tabelle 4: Typisches Belastungsbild der Untersuchungstype.....	14
Tabelle 5: Typische Toleranzen der Untersuchungstype	15
Tabelle 6: Mechanische Daten: Grafil 34/600WD // SGL C30 T050 EPY	18
Tabelle 7: Berechnete Laminatwerte aus dem Wickelaufbau.....	18
Tabelle 8: Kennwerte des Matrix-Systems: System A // System B.....	19
Tabelle 9: Untersuchte Rohstoffkombinationen	20
Tabelle 10: Versuchsparameter des Batch VEB0090	21
Tabelle 11: Definition Strategischer Vorteil [GRN 09].....	30
Tabelle 12: Unterteilung der Fertigungsschritte nach Kernkompetenz im Fallbeispiel	35
Tabelle 13: Spulenberechnung im konventionellen Prozess [TMa 11]	46
Tabelle 14: Ergebnisse der Untersuchung [TMa 08]	60
Tabelle 15: Gewählte Abminderungsfaktoren an der Klebefläche	60
Tabelle 16: Mechanische Daten des PUR 103	68
Tabelle 17: Gegenüberstellung der Zeiten im Wickelprozess [TMa 11].....	86
Tabelle 18: Anbieter von FKV-Walzen [TMa 11].....	119
Tabelle 19: Angenommene Berechnungswerte [TMa 11].....	120
Tabelle 20: Materialkennwerte der UD-Schicht bei $\phi = 60\%$, [Scs 12], [Krl 92].....	120
Tabelle 21: Definierter fiktiver Laminataufbau	121
Tabelle 22: Abwicklungszeiten pro Sektion [TMa 11].....	134
Tabelle 23: Verwendete Maschinen im konventionellen Prozess [TMa 11]	138
Tabelle 24: Anzahl der verwendeten Maschinen im Leanen Prozess.....	144
Tabelle 25: Befragte Maschinenlieferanten	144
Tabelle 26: Befragte Rohstofflieferanten.....	145
Tabelle 27: Errechnete Abwicklungszeiten pro Sektion im Leanen Prozess [Fl 12].....	145

8.4 Zitierte Patente

- DE10 2007019566 A1
- DE10 2006035274 A
- EP09 95560 A2
- EP09 95560 B1
- EP09 60702 A2
- EP08 08701 B1
- EP0334211 B1
- JP10 086143 A

9 Anhang

zu Kap. 2: Das Papier

Papierherstellungsprozess

Das Grundprinzip der Papierherstellung hat sich in Jahrhunderten kaum bis nicht verändert. Holzfasern werden unter Zugabe von Wasser aufgeschlossen. Aus der daraus entstehenden hoch verdünnten Faserstoffsuspension werden die Fasern mittels eines schnell laufenden Siebes wieder vom oberflächigen Wasser getrennt, sodass sich ein Faservlies bildet. Die verbleibende Feuchtigkeit wird anschließend im Prozess durch mechanische Kräfte und Wärme entzogen. Eine Papiermaschine ist, je nach Papierart und somit Komplexität, in verschiedene Sektionen (Partien) unterteilt. Im sogenannten Stoffauflauf wird die Faserstoffsuspension auf das laufende Sieb gebracht. In der Siebpartie der Papiermaschine findet der eigentliche Blattbildungsprozess statt. Direkt über der sogenannten Brustwalze wird der hoch verdünnte Papierbrei (auch Pulp genannt) mit etwa 0,6 % Feststoff und 99,4 % Wasser als flacher, bei großen Papiermaschinen bis zu zehn Meter breiter Strahl auf die Oberfläche des umlaufenden Siebes aufgetragen. Für die Festigkeit und die Gleichmäßigkeit zahlreicher Papierqualitäten ist es jedoch wichtig, dass sich die Fasern gut vermischen und in sogenannter „Wirrlage“ auf dem Sieb ablegen. Durch Streichen des Papiers lässt sich diese Unterschiedlichkeit der Oberfläche weitgehend ausgleichen.

Wenn die urgeformte Papierbahn die Siebpartie durchlaufen hat, ist diese fest genug, um vom Abnahmefilz vom Sieb abgenommen und in die sogenannte Pressenpartie geführt zu werden. In der folgenden Pressenpartie wird über mechanischen Druck die Restfeuchte auf 55 % minimiert. Da eine weitere mechanische Wasserentfernung durch Pressen oder Saugen die Faserstruktur beschädigen würde, ist die Entwässerung jetzt nur noch durch Trocknung mittels Wärme- einwirkung möglich.

Der energiereichste Teil der Papiermaschine ist die nachfolgende Trockenpartie. Hier wird über das teilweise Verdampfen des im Papier befindlichen Wassers der Faseranteil erhöht werden. Mit dampfbeheizten Heizzylindern wird dieser Prozess vorgenommen. Erst in der Trockenpartie erreicht das Papier seine endgültige Festigkeit. Das Papier erreicht die endgültige Konsistenz nach dem Verlassen der Trockenpartie, es kann nun mit einem Feststoffgehalt von 92 bis 95 % gerechnet werden. Nach der Kühlung wird das Papier, je nach Type, in das Glättwerk überführt. Maschinenglatte Papiere (Zeitungsdruck) durchlaufen hier unmittelbar vor dem Aufrollen ein System von übereinander angeordneten Hartgusswalzen mit mindestens zwei, im Normalfall fünf bis acht Walzen (auch Kalandrierung genannt). Durch starken Druck auf die Bahn wird die Dicke des Papiers ausgeglichen, die Oberflächenglätte der beiden Papierseiten und damit die Bedruckbarkeit nehmen zu. Final wird die fertige Papierbahn auf einen sogenannten Stahltambour aufgewickelt, auf dem die Bahnware bis zur Weiterverarbeitung verbleibt. Je nach Papiersorte kann ein solcher Tambour bis zu 25.000 kg aufnehmen – eine Papierbahn von etwa 60 km Länge. Komplexe und gleichsam hoch belastete Kohlenstofffaserwalzen für die Papierindustrie werden ausnahmslos in einer Handmanufaktur hergestellt.

[Quellen: [Buj 05], [PMT 03]]

zu Kap. 3: Faser und Öl

(1) Prognose Preisentwicklung C-Faser

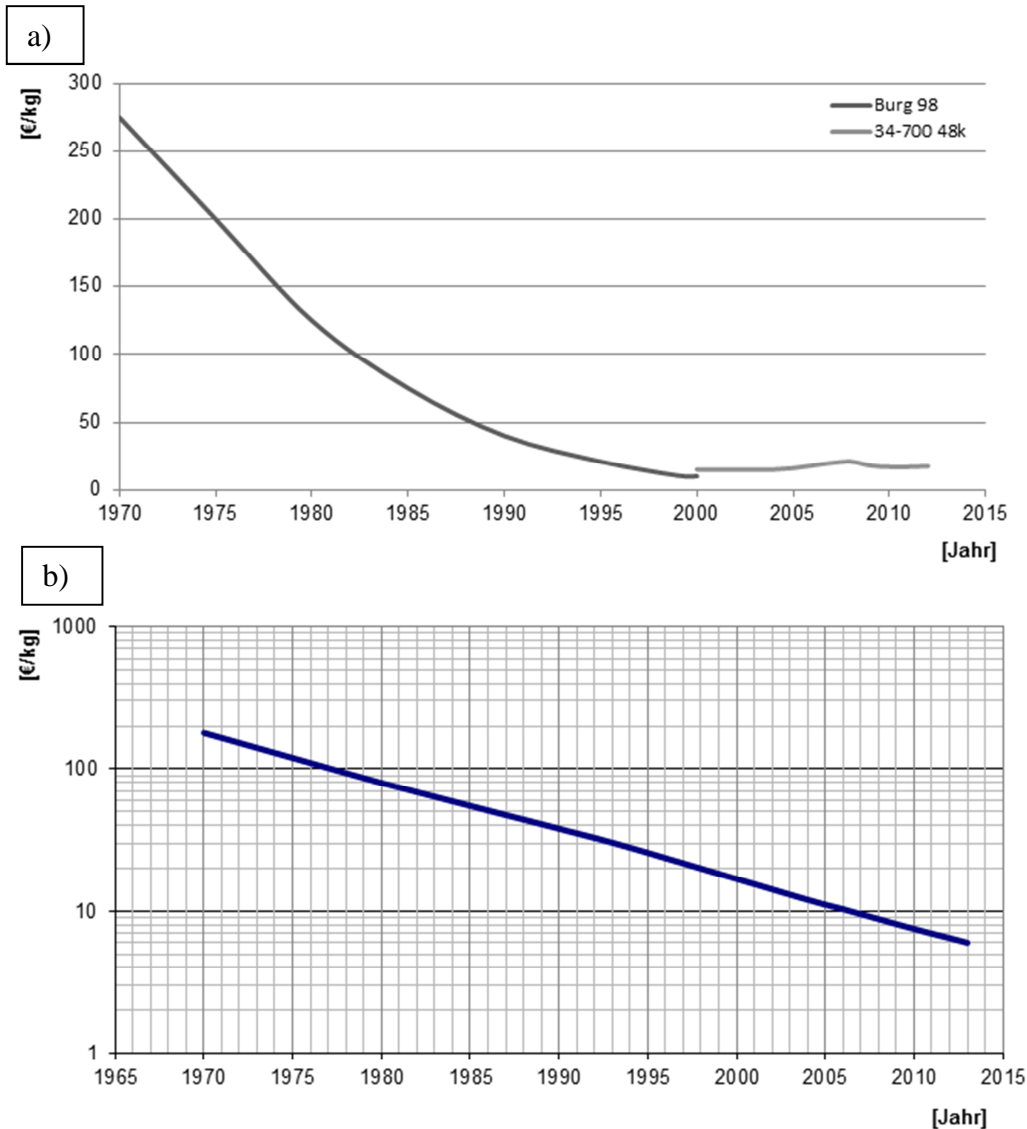


Abbildung 78: Preisentwicklung, a) Prognose Entwicklung der C-Faser-Preise [Bup 98], b) Prognose Entwicklung der C-Faser-Preise [Sca 07]

(2) Abhängigkeit vom Rohöl

Im folgenden Kapitel wird aufgezeigt, wie unmittelbar der C-Faser-Preis vom Rohölpreis, bedingt durch das PAN, abhängt. Der größte Teil der heute gebräuchlichen Kohlenstofffasern wird durch eine Stabilisierungsreaktion an Luft und anschließender Pyrolyse unter Schutzgas aus Polyacrylnitril gefertigt (ausgenommen hiervon die sogenannten „Pech“-Fasern [Heh 86]). Polyacrylnitril entsteht aus der Polymerisation von Acrylnitril. Acrylnitril wiederum ist das Nitril der Acrylsäure. Haupteinsatzgebiet von PAN ist die Herstellung von Spinnfasern, sogenannte Synthefasern [BBO 07]. Abbildung 79 zeigt, dass zwischen der Preisänderung vom Rohöl (sogenanntes Crude Oil) und PAN (Acrylnitril) nur wenige Monate Verzug liegen.

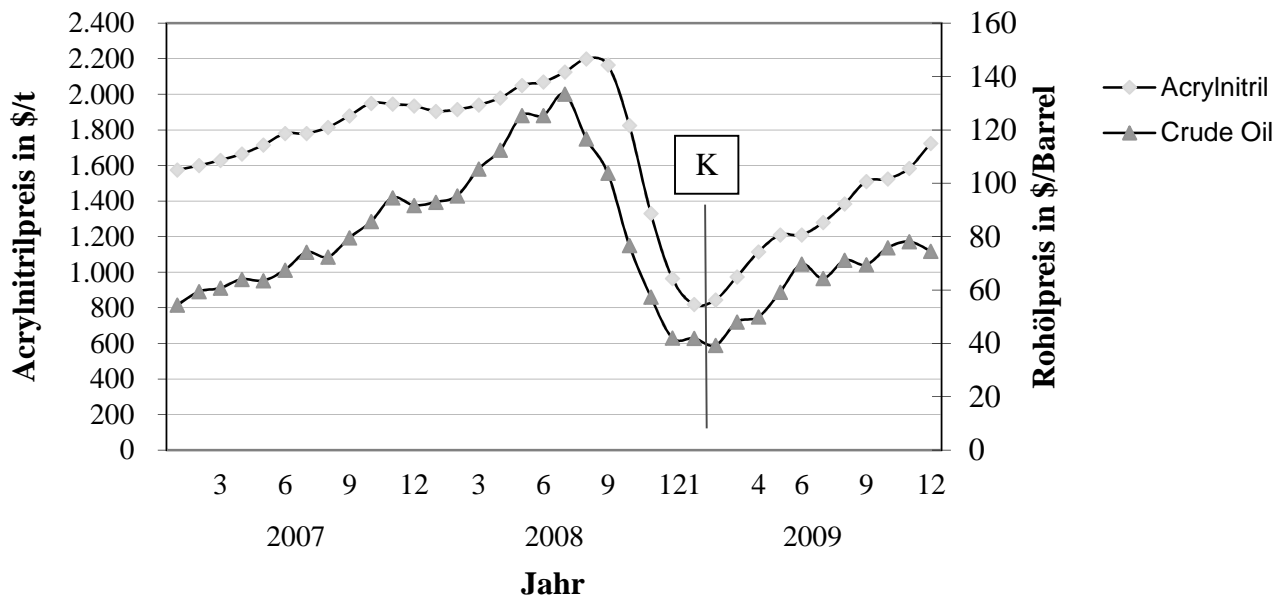


Abbildung 79: Abhängigkeit des Acrylnitrils vom Rohölpreis [TMA 11]

Wirtschaftlich aufstrebende Nationen haben einen steigenden Energie- und Rohstoffbedarf. In den vergangenen Jahren sorgten diese Länder für eine wachsende Nachfrage nach Öl, vgl. Abbildung 80, und daraus folgend für eine kontinuierliche Erhöhung der Preise. In der 2007/08er Weltwirtschaftskrise hat sich die Lage leicht entspannt, aber das weltweite Wirtschaftswachstum und die Rohölpreise verhalten sich umgekehrt proportional. Die Kosten für die Förderung von Erdöl werden erwartungsgemäß steigen, da neue Quellen mit immer höherem Aufwand erschlossen werden müssen. So werden beispielsweise schon heute ölhaltige Sande abgebaut und aus diesen das Öl mithilfe aufwendiger Verfahren extrahiert. Die Kosten der Kohlenstofffaser-Herstellung werden im Wesentlichen vom Ausgangsmaterial, dem Precursor (PAN) selbst sowie den Herstellkosten, also der Umwandlung zur eigentlichen Kohlenstofffaser, geprägt. Zur Herstellung eines Kilogramms Kohlenstofffaser werden etwa zwei Kilogramm Precursor benötigt. Die Preisentwicklung vom Acrylnitril, aufgezeichnet über drei Jahre, zeigt, dass eine direkte Abhängigkeit zum Rohölpreis vorliegt. In 2006 erlebten viele Verwender von C-Fasern eine Engpasssituation, dadurch gekennzeichnet, dass viele Kleinabnehmer nur noch bedingt versorgt werden konnten. Die Produzenten antworteten mit einer Kapazitätserhöhung, fast zeitgleich kam es teilweise zu spürbaren Verzögerungen bei einigen Großprojekten im Luftfahrtbereich, gefolgt von der zweiten Wirtschaftskrise. Dieser Knick (**K**) ist in Abbildung 79 sowie Abbildung 80b in den Jahren 2008-2010 gut zu erkennen. Dies erklärt auch den historisch einmaligen tiefen Preis der HT-Faser im Jahr 2010. Das Chart in Abbildung 80a zeigt den wachsenden Bedarf an C-Fasern sowie den prognostizierten Aufbau an Kapazität. Es bedeutet, dass im Jahr 2018 der Bedarf höher sein wird, als die bis dahin aufgebauten Kapazitäten, sofern die Produzenten dem Trend nicht entgegenwirken.

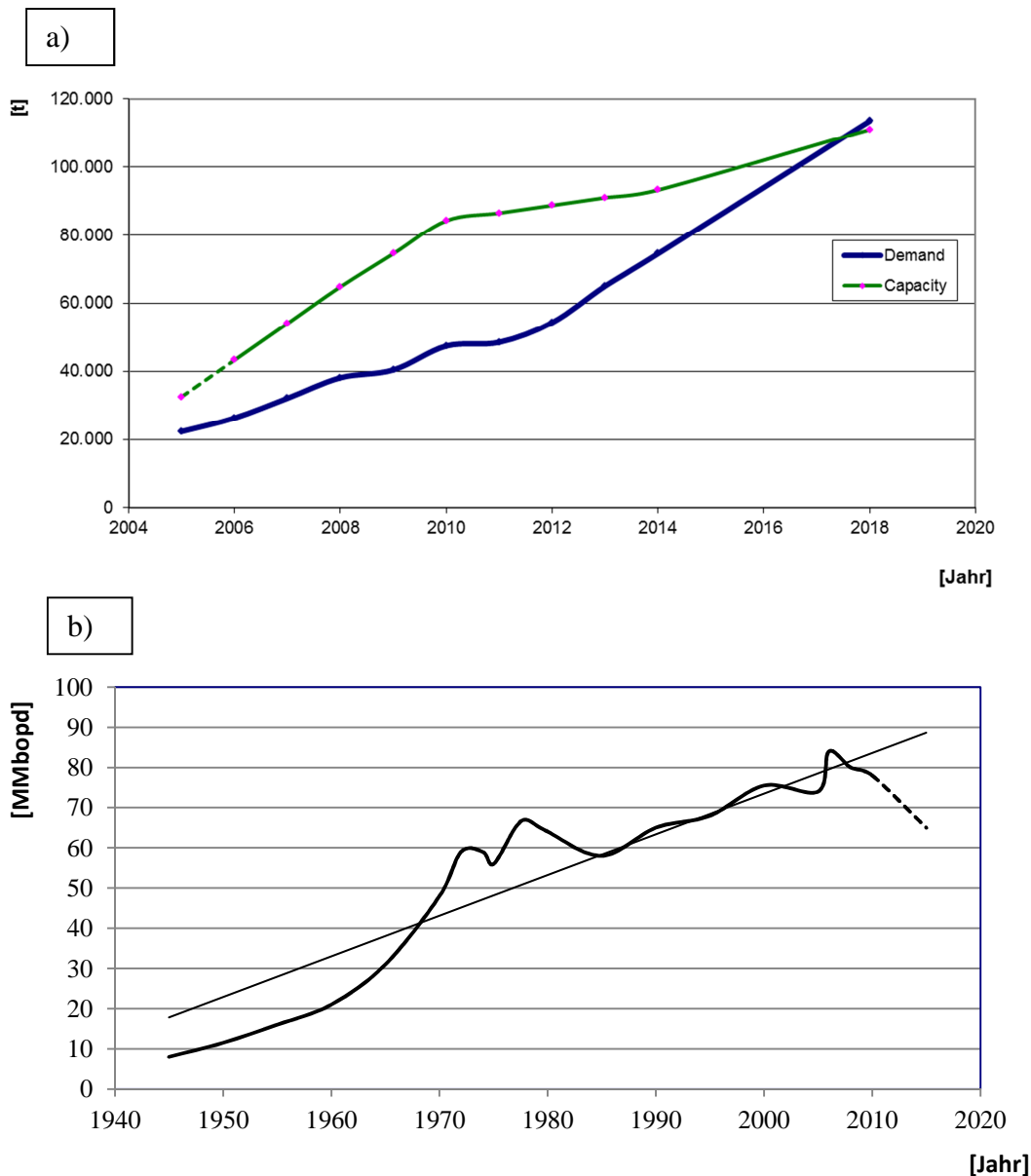


Abbildung 80: Kapazität und Prognose [TMa 11], a) Kapazität zu Verbrauch C-Faser, b) Entwicklung und Prognose der weltweiten Ölförderung

Die Technologie der Herstellung von Kohlenstofffasern basierend auf der PAN-Technologie ist auf das Jahr 1959 zurückzuführen. Ein Team, geführt von AKIO SHINDO am Industrial Research Institute in Osaka, war das erste, das aus PAN-Material Kohlenstofffasern produzierte. Für das Herstellungsverfahren sind Temperaturen zwischen 1.300 und 2.500°C notwendig. In der Stabilisierungsstufe reagiert das thermoplastische Polyacrylnitril in einer oxidierenden Umgebung. Dabei erfolgt neben der Abspaltung von Wasserstoff eine Vororientierung des Moleküls zu einem sogenannten Leiterpolymer, aus dem durch Ringschluss (Zyklisierung) eine Kette von Pyridin-Sechsringen (Ring, welcher aus fünf Kohlenstoffatomen und einem Stickstoffatom besteht) entsteht. Die so erhaltene Faser ist unschmelzbar, was Voraussetzung für die nachfolgende Carbonisierung ist. Abbildung 81 zeigt den energetisch aufwendigen Herstellungsprozess von Kohlenstofffasern [AVK 09] mit den unterschiedlichen Graden. Die notwendigen Temperaturen werden meist in großvolumigen Öfen erzeugt.

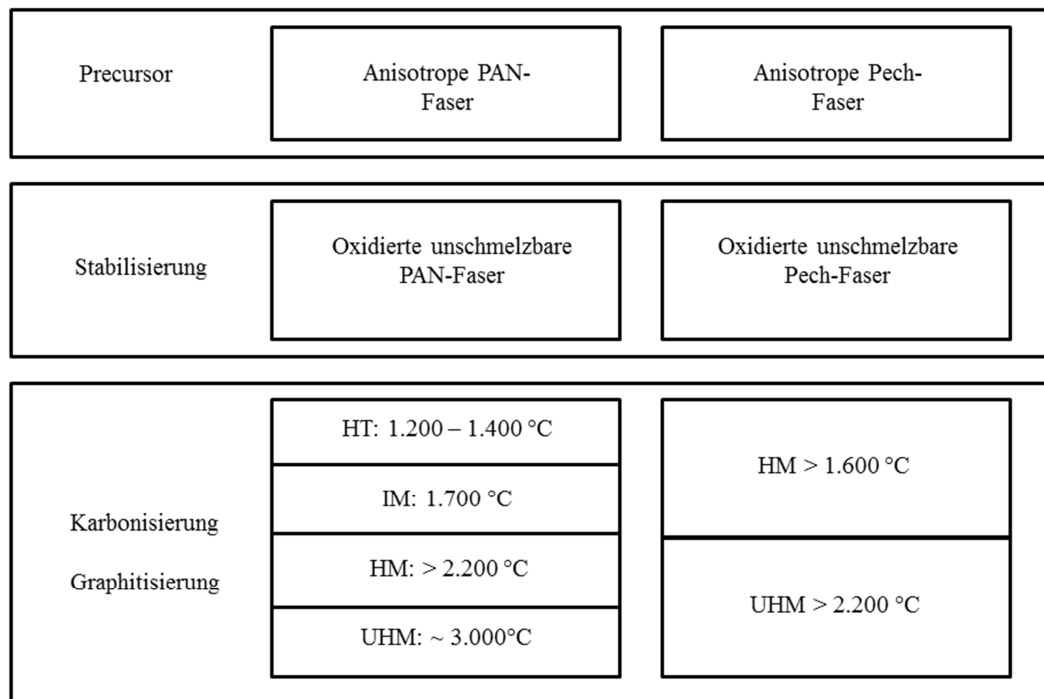


Abbildung 81: Herstellungstemperaturen der unterschiedlichen Fasertypen [AVK 09]

(3) Veränderung der Stahl-Rohstoffkosten

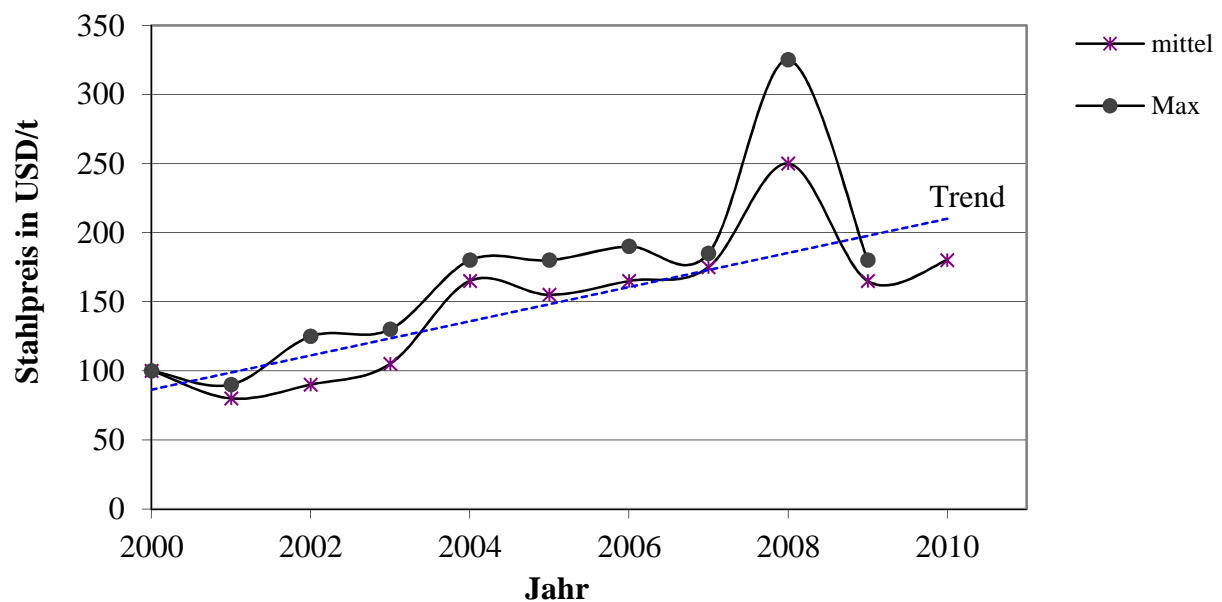


Abbildung 82: Veränderung der Rohstoffkosten über 10 Jahre [TMa 11]

(4) Kohlenstofffaserkapazitätsaufbau

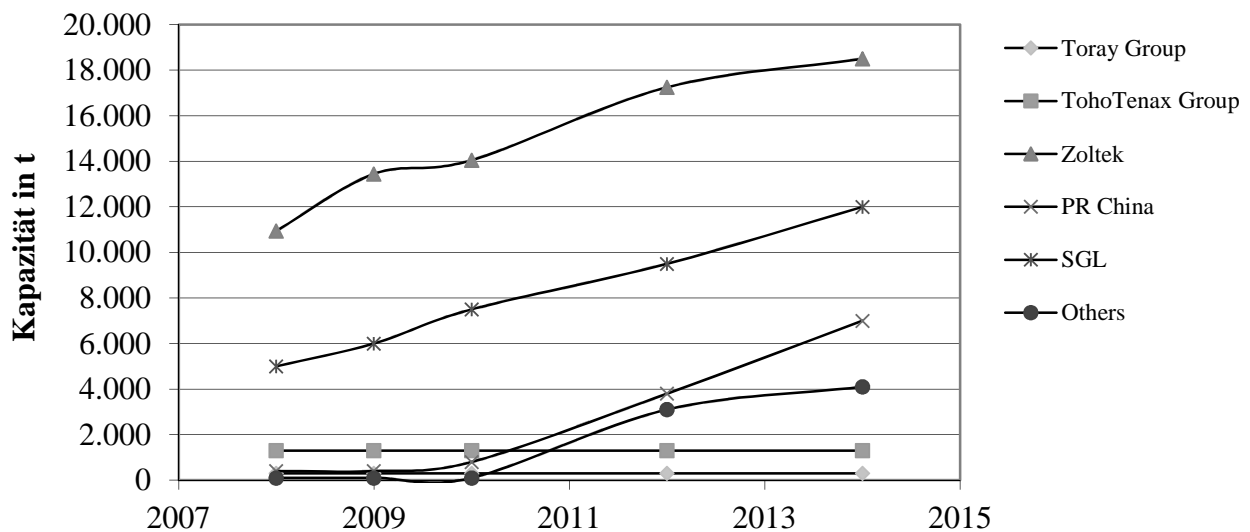


Abbildung 83: Kohlenstofffaserkapazitätsaufbau Heavy Tow weltweit [TMa 11]

(5) Strategische Vorgehensweise

Der chinesische Philosoph SUN TSE (circa 500 v. Chr.) hat den Begriff Strategie [Zis 94] schon vor mehr als zweitausend Jahren in seiner Abhandlung „Über die Kriegskunst“ verwendet. Im alten Griechenland bezeichnete man einen General als *Strategos*. In der Wirtschaft werden klassisch unter Strategie die (meist langfristig) geplanten Verhaltensweisen der Unternehmen zur Erreichung ihrer Ziele verstanden. In diesem Sinn zeigt die Unternehmensstrategie in der Unternehmensführung, auf welche Art ein mittelfristiges (circa 2 bis 4 Jahre) oder langfristiges (circa 4 bis 8 Jahre) Unternehmensziel erreicht werden soll. Diese klassische Definition von Strategie wird heute vor allem aufgrund ihrer Annahme der Planbarkeit kritisiert. Sie hat deswegen einige Erweiterungen erfahren, z.B. durch MINTZBERG [Mih 07]. Schon PORTER rückt leicht vom Konzept der Planbarkeit ab [Pom 99]. Für ihn ist nicht die langfristige Planung relevant, sondern die Fähigkeit, auf der Grundlage einer längerfristigen Betrachtungsweise einen Wettbewerbsvorteil zu entwickeln, der auf klaren Unterscheidungsmerkmalen beruht. Das heißt, MINTZBERG setzt für die klassische Strategie zwei Bedingungen: a) Erstens muss ein Plan (intended strategy) existieren, der b) zweitens, vollständig in die Tat umgesetzt wird (realized strategy). Aber verändert sich in diesem Falle die Umwelt, zum Beispiel das angestrebte Ziel wird unerreichbar oder es bietet sich eine außergewöhnlich gute Gelegenheit, dann kann es durchaus passieren, dass das ursprüngliche Ziel fallen gelassen und ein neues Ziel angestrebt wird. Es ist diese Flexibilität, welche die unternehmerische Strategie auszeichnet. Laut GRONAU [Grn 09] ist die Strategie der Entwurf und die Durchführung eines Gesamtkonzeptes zur Erreichung einer Zielposition in Auseinandersetzung mit dem Wettbewerb. Hierzu ist die Schaffung einer hochwertigen Marktposition notwendig. Den klassischen Ansatz von Strategie formulierte PORTER etwa so. Es ist notwendig, sich Ziele zu setzen, welche mit verschiedensten Mitteln erreicht werden können. Mittel hierfür können die Märkte, das Marketing, die Umsatzgröße, die Fertigung, das Personal, die Forschung usw. sein. Grundlage für die Formulierung einer Strategie ist die Kenntnis über die Branche. Laut PORTER wird die im Wesentlichen von fünf Kräften beeinflusst. Diese können wie folgt beschrieben werden: Zentral aufgestellt stehen die Wettbewerber, dies beschreibt PORTER als die erste Kraft. Die übrigen Einflussgrößen sind: die Verhandlungsstärke der Lieferanten, die Verhandlungsmacht der Abnehmer, die Bedrohung durch

neue Konkurrenten sowie die Bedrohung durch Ersatzprodukte oder Dienste. Diese Kräfte müssen bekannt sein, um eine Positionierung zu erlauben [Pom 99].

(6) Produktlebenszyklus des Untersuchungsgegenstandes

Das Modell des Produktlebenszyklus wurde von der BOSTON CONSULTING GROUP entwickelt. Es unterstellt, dass jedes Produkt von der Markteinführung bis zur Einstellung einen Lebenszyklus durchläuft. Dieser besteht aus vier Phasen. In der ersten Phase der Entwicklung und Einführung ist das Produkt noch eine Neuheit. Viele Produkte weisen in der Einführungsphase noch ein relativ hohes Preisniveau auf. Dies ist zum einen erforderlich, da die Produzenten noch keine Erfahrungskurveneffekte und Skaleneffekte aus einer Serie nutzen können. Nach dem Boston-Consulting-Group-Portfolio, auch BCG-Matrix genannt, Abbildung 84, ist dies der Bereich der „Question Marks“.

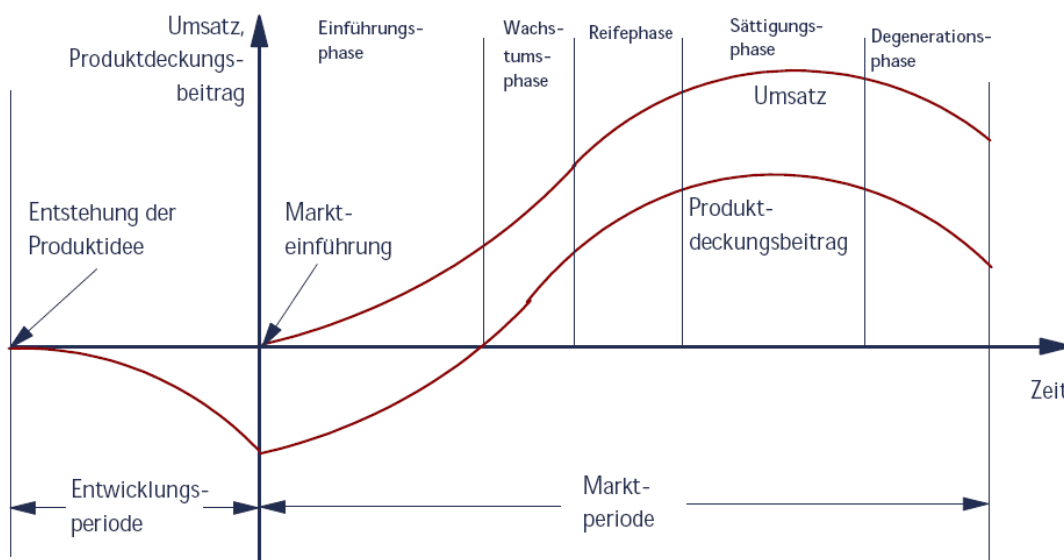


Abbildung 84: Produktlebenszyklus nach GRONAU [Grn 09], (Originalbild)

Oft erreichen Produkte nur dann die Phase exponentiellen Wachstums, wenn sie eine kritische Absatzmasse überschreiten konnten. Durch den raschen Umsatzanstieg überschreitet das Produkt die Schwelle vom Nischenprodukt, das nur für wenige Nutzer interessant ist, zum Massenerzeugnis. Zu diesem Zeitpunkt treten häufig die ersten Wettbewerber in den Markt ein. Auch in dieser Phase wird das Preisniveau noch hoch sein, da der Anbieter die Vorlaufkosten abdecken muss. Weiterhin können in dieser Phase noch geringen Wettbewerbs die höchsten Gewinnmargen erzielt werden. Nach der BCG-Matrix ist dieser Bereich mit „Stars“ gekennzeichnet. Bei Erreichen eines bestimmten Absatzniveaus und durch den verstärkten Wettbewerb erreicht das Produkt die Reifephase. Der Markt ist jetzt gesättigt. Weiteres Wachstum kann nur noch bedingt oder unter sehr hohen Aufwendungen erreicht werden. Hier ist es vorrangiges Ziel, den Marktanteil zu halten. Durch den verstärkten Wettbewerbsdruck wird das Preisniveau absinken. Allerdings muss der Hersteller zu diesem Zeitpunkt in der Position sein, Kostenvorteile aus der Serienproduktion zu generieren. Nach der BCG-Matrix wird dieser Bereich dann mit „Cash Cows“ bezeichnet. Nach einer gewissen Zeit wird der Absatz des Produktes zurückgehen. Der Grund ist häufig eine technische Ablösung. Der Eintritt dieses Zeitpunktes kann durch Modellupdates herausgezögert werden. Der letzte Bereich wird mit „Poor Dogs“ markiert. Es darf davon ausgegangen werden, dass der Untersuchungsgegenstand das Ende der Reifephase

erreicht hat und in die Sättigungsphase eintritt. Neben dem Boom der Dünnfilmtechnik [VEN 10] erwarten die Analysten starke Bewegung bei Maschinenherstellern von Anlagen und Systemen für Ingots und Wafern. So veränderte sich die weltweit installierte PV-Leistung von 1.428 MWp aus dem Jahr 2000 auf 21.530 MWp in 2009 [Vow 10]. Betrachtet man beispielsweise die Umsatzentwicklung eines börsennotierten Herstellers aus dem Bereich RE (MeyerBurger/Schweiz), ein Verwender der beschriebenen Technologie, so verzeichnete das Unternehmen in 2006 einen Umsatz von 82,6 Mio. CHF, in 2010 schon 630 Mio. CHF (anzumerken sei, dass der Umsatz durch Zukäufe entlang der Wertschöpfungskette überproportional gestiegen ist) [PMX 10].

zu Kap. 4: Marktinformationen

(7) Produzenten im Bereich FKV-Walze

Zu Untersuchungsbeginn konnten im europäischen Markt folgende Produzenten oder Veredler für FKV-Walzen sondiert werden.

Tabelle 18: Anbieter von FKV-Walzen [TMa 11]

Firmenname	Ort / Land	Stellenwert
HÄHL Walzen GmbH	Kieselbronn / D	A ***
xperion FS Composites GmbH & Co.KG	Laudenbach / D	A **
VOITH PAPER	Heidenheim / D	A **
INOMETA Tubes GmbH	Herford / D	A *
Epsilon Rollers	Gaillan en Médoc / F	A *
FWT Wickeltechnik GmbH	Neunkirchen / Ö	B
Güldenring Maschinenbau GmbH	Eitorf / D	B
Roller Systems GmbH Bielefeld	Bielefeld / D	B
FKM Walzentechnik	Duisburg / D	B
AST Beschichtungstechnik GmbH	Rot am See / D	B
Lüraflex GmbH	Neuss / D	B

Der Buchstabe „A“ in der Spalte Stellenwert steht für die Hierarchie in Technologie sowie Marktführerschaft im Bereich FK-Walze. Hierbei ist zu beachten, dass die Marktsegmente in Papier, Druck, Folie und Converting aufgeteilt sind. Die Anzahl der Sterne bezeichnet das Potenzial der Firmen, weiter wachsen zu können. Die Treiber für das Wachstum, wie Innovation, Technologie und Globalisierung werden hier nicht weiter untersucht. Die Firmen xperion und Inometa gehören zu einer Besitzergruppe, diese Gruppe kann als Marktführer für FKV-Walzen bezeichnet werden. Hier vereint findet sich mit Abstand die höchste Konzentration an Filament-Winding-Maschinen. Die Erweiterung wurde fast ausschließlich über sehr zielgerichtete Zukäufe realisiert. Die Firma Hähl hingegen wächst organisch auch in asiatische Märkte hinein. Alle mit „A“ gekennzeichneten Firmen, mit Ausnahme von VOITH Paper, haben kein OEM-Geschäft. Lediglich Voith Paper, einer der größten Papiermaschinenhersteller der Welt, hat einen erheblichen Eigenmarkt aufgrund der integrierten Konzernsparten. Epsilon Rollers unterscheidet sich von den restlich aufgezeigten Produzenten dahin gehend, dass die Herstellungstechnik nicht Filament-Winding, sondern Pullwinding ist. Alle in Abbildung 20 aufgeführten Produzenten, mit Ausnahme von Voith Paper, sind Mittelständler, Voith Paper hingegen hat einen ausgeprägten Konzerncharakter. Dieser Konzerncharakter hat neben dem Vorteil der wirtschaftlichen Stärke den nicht unerheblichen Nachteil der Trägheit und innerbetrieblichen Hierarchie sowie Kompetenzstrukturen, welche für die Entwicklung als hinderlich zu sehen ist.

(8) European Precursor GmbH

Einen Zuschuss in Höhe von 1,5 Mio. EUR hat die European Precursor GmbH (EPG, Kelheim) von der bayerischen Wirtschaftsförderung für die Entwicklung neuartiger Polyacrylnitrilfasern (PAN) mit deutlich verbesserten Eigenschaften erhalten. EPG wurde Ende 2006 als Joint Venture zwischen der SGL GROUP und LENZING AG gegründet. Es soll die exklusive Rohstoffversorgung für die SGL-Karbonfaserfertigung sicherstellen. Beide Unternehmen haben bislang rund 25 Mio. Euro in die Kelheimer Fertigungsanlage investiert [Akt 12].

zu Kap. 5: Berechnungswerte, Maschinen, Beschichtung und Tabellen

(9) Angenommene Berechnungswerte

Tabelle 19: Angenommene Berechnungswerte [TMa 11]

Bezeichnung	Wert	Einheit
Laminierharz	7,5	[€/kg]
Kohlenstofffaser	16	[€/kg]
PU-Harz	7,5	[€/kg]
Ofen 2 m Länge	36 peak	[kW]
Ofen 8 m Länge	54 peak	[kW]
FW-Maschine	40 peak	[kW]
Drehen 2m	22 peak	[kW]
Drehen 8m	7,5 peak	[kW]

(10) Materialkennwerte der CFK-UD-Einzelschichten

Tabelle 20: Materialkennwerte der UD-Schicht bei $\phi = 60\%$, [Scs 12], [Krl 92]

Bezeichnung	Wert x	Wert y	Einheit
Elastizitätsmodul E^1	135	8,7	[GPa]
Querkontraktionszahl ν^1	0,30	0,02	-
Schubmodul G^1	5.400		[MPa]
Zugfestigkeit σ_Z^1	1.700	30	[MPa]
Wärmeausdehnung α^2	-0,5	43	[$10^{-6}K^{-1}$]
Quellkoeffizient Υ^2	0	4	[$10^{-3}/\%M$]

¹ entnommen aus: [Scs 12]

² entnommen aus: [Krl 92]

(11) Definition Laminataufbau

Tabelle 21: Definierter fiktiver Laminataufbau

Schicht	Winkel	n Rovings	Ø innen	Wand	Ø aussen	P	Bandbreite	Wickelzeit
	[°]		[mm]	[mm]	[mm]		[mm]	[min]
1	90	12	235,00	1,02	237,04	1	40,00	5,49
2	12	12	237,04	2,02	241,07	18	41,68	14,20
3	12	12	241,07	2,09	245,26	19	40,16	15,01
4	12	12	245,26	2,06	249,37	19	40,86	15,02
5	90	12	249,37	1,02	251,41	1	40,00	5,84
6	30	12	251,41	2,39	256,18	20	35,23	12,26
7	12	12	256,18	2,07	260,33	20	40,54	15,84
K								
8	12	12	260,33	2,04	264,41	20	41,20	15,85
9	12	12	264,41	2,01	268,43	20	41,84	15,86
10	90	12	268,43	1,02	270,47	1	40,00	6,30
11	12	12	270,47	2,06	274,59	21	40,76	16,68
12	30	12	274,59	2,40	279,40	22	34,98	13,56
13	12	12	279,40	2,00	283,39	21	42,11	16,70
K								
14	90	12	283,39	1,02	285,43	1	40,00	6,66
15	12	12	285,43	2,05	289,52	22	41,06	17,52
16	12	12	289,52	2,02	293,56	22	41,65	17,53
17	12	12	293,56	2,08	297,72	23	40,40	18,34
18	30	12	297,72	2,42	302,55	24	34,76	14,87
19	90	12	302,55	1,02	304,59	1	40,00	7,14
20	12	12	304,59	2,01	308,60	23	41,92	18,38
21	12	12	308,60	2,07	312,73	24	40,70	19,19
22	12	12	312,73	2,04	316,81	24	41,24	19,20
23	90	12	316,81	1,02	318,85	1	40,00	7,49
24	12	12	318,85	2,00	322,85	24	42,05	19,22
25	30	12	322,85	2,42	327,68	26	34,80	16,20
26	12	12	327,68	2,03	331,73	25	41,49	20,06
K								36,25
27	90	12	331,73	1,02	333,77	1	40,00	7,86
28	12	12	333,77	2,07	337,91	26	40,63	20,88
29	45	12	337,91	2,83	343,56	26	29,74	20,90
Summe								456,3

Die für die Berechnung zusammengefassten Lagen, in Summe 21, sind in der Tabelle farblich markiert, Spalte „Schicht“ und „Winkel“. Wickelaufbau erweitert und ergänzt nach [MKe 08].

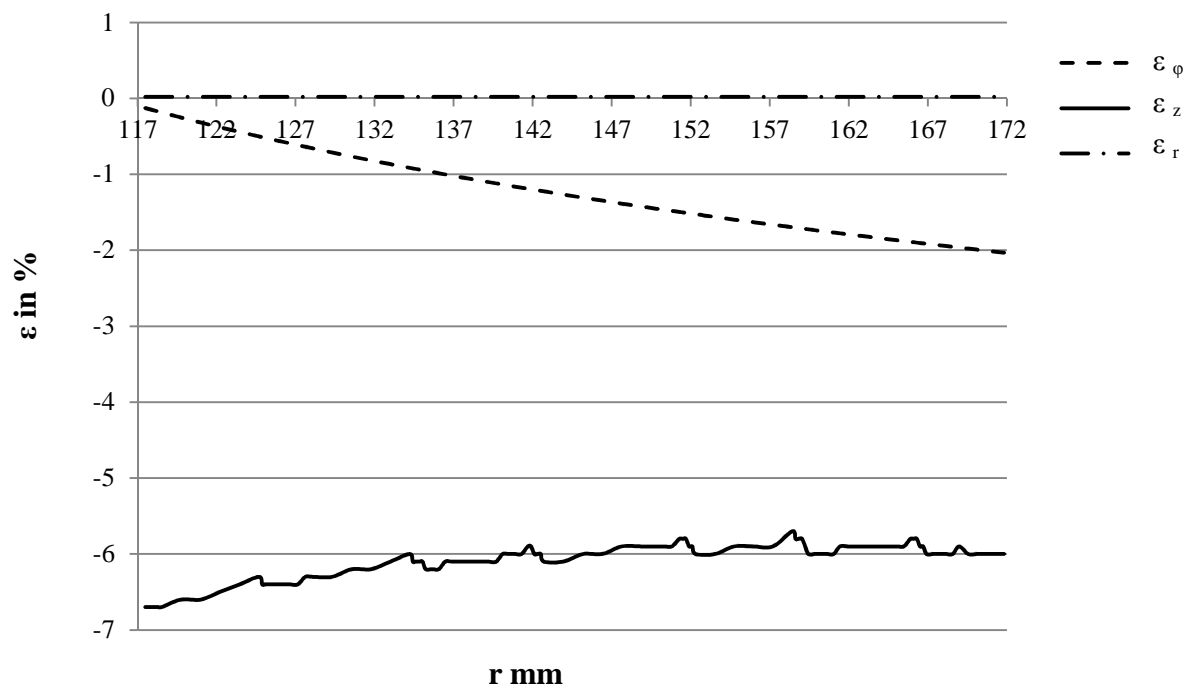
(12) Hygrothermische Berechnungen

Abbildung 85: Dehnung unter Temperatureinfluss

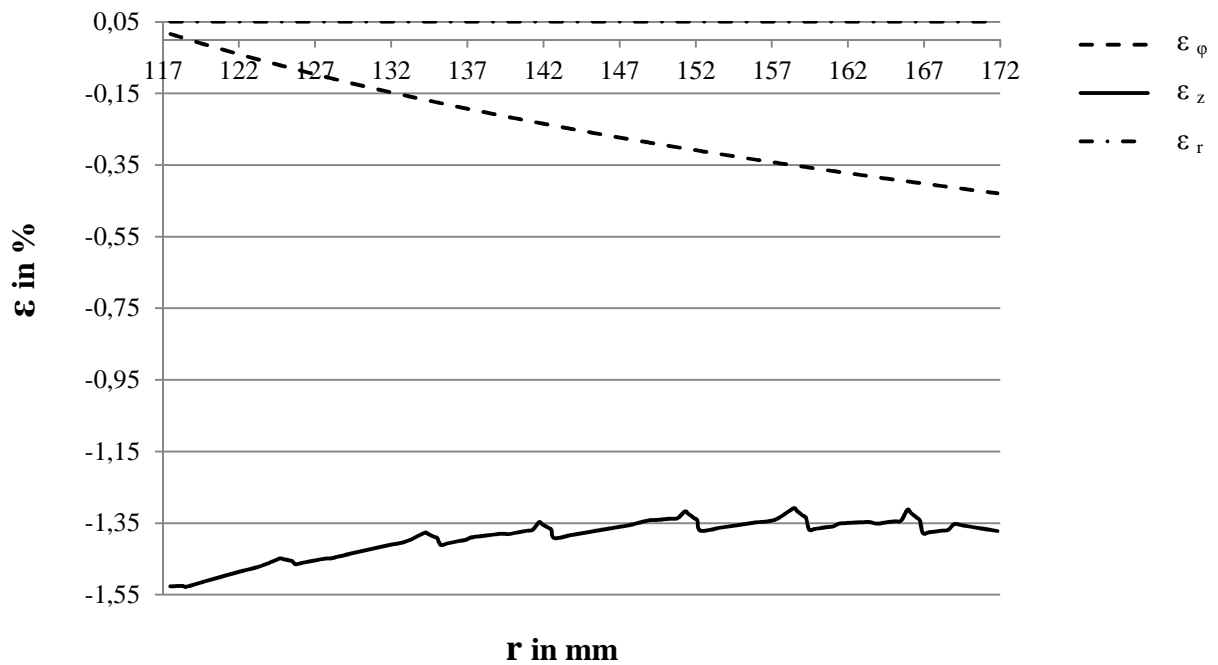


Abbildung 86: Dehnung unter Temperatureinfluss und Feuchte

(13) Ermittlung vom Glasübergangspunkt

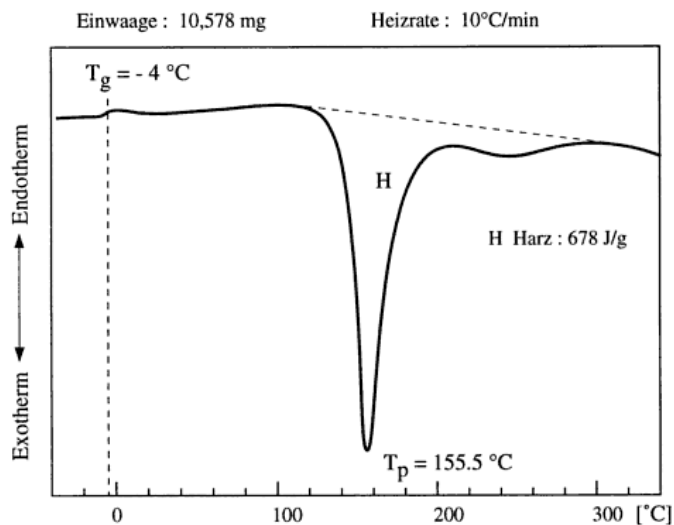


Abbildung 87: DSC-Kurve eines EP-Harzes, (Originalbild)

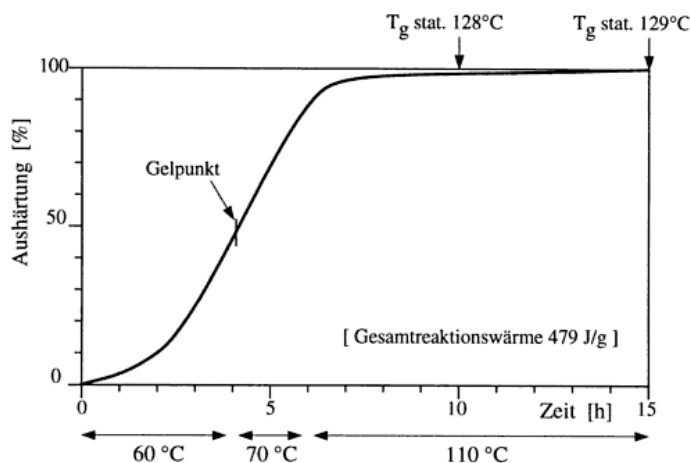


Abbildung 88: Verlauf des Aushärtegrades, (Originalbild)

Das Visualisieren der Härtingsreaktion kann unter Zuhilfenahme der sogenannten DSC-Methoden (Differential Scanning Calorimetry) gut verfolgt werden [FZR 95]. Die Abbildung 87 zeigt eine DSC-Kurve für ein bereits ausgehärtetes Epoxidsystem, welches mit einer Heizrate von 10 °C pro Minute gefahren wurde. Die dargestellte Fläche unter dem Graph zeigt ein Maß für den exothermen Wärmeumsatz bei der Reaktion. Der nach unten zeigende Graph stellt somit die Größe für die Energieabgabe nach außen dar.

In der Technik wird die Glas-Übergangstemperatur (T_G) als diejenige Temperatur bezeichnet, bei der Polymere, dies betrifft aber nur ganz oder teilweise amorphe Polymere, vom flüssigen oder gummielastischen, also flexiblen Zustand, in den glasartigen oder hartelastischen, auch spröden Zustand übergehen. Diese wird auch als Erweichungstemperatur bezeichnet. Anhand dieser Temperatur (T_G) können verschiedene Kunststoffe untereinander unterschieden werden. Eine Überschreitung der Glasumwandlungstemperatur führt zu wesentlichen Änderungen der physikalischen und mechanischen Eigenschaften des Werkstoffes. Ein thermoplastischer Kunststoff würde hier in den flüssigen Zustand

übergehen, der Schubmodul wäre gleich null, wo hingegen der Schubmodul des Duroplasten sich auf ein Niveau erniedrigt, das der Vernetzungsdichte durch die chemische Bindung entspricht. Mit anderen Worten, das Überschreiten der Glas-Übergangstemperatur bringt immer eine Erniedrigung des Schubmoduls mit sich [MJF 90]. Abbildung 88 zeigt den Verlauf des Aushärtegrades in Funktion der Temperatur. Nach vier Stunden Härtezeit wird der Gelpunkt bei 50% der Aushärtung erreicht. Nach weiteren sechs Stunden ist der statische T_G von 128 °C erreicht.

(14) Rohstofflager im konventionellen Prozess

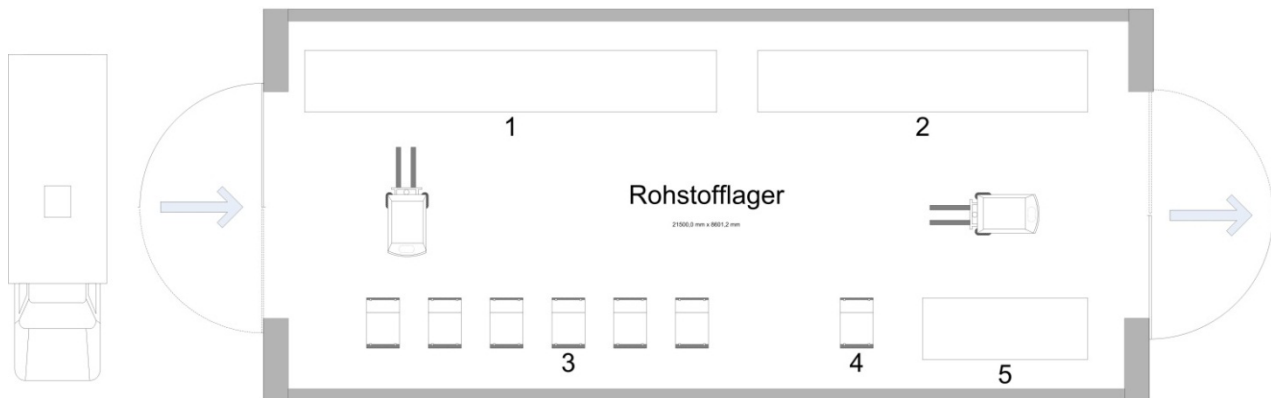


Abbildung 89: Rohstofflager (Sektion 1)

(15) Wochenbedarf im konventionellen Prozess

Der platzdominierende Wochenbedarf setzt sich zusammen aus:

- 34 Paletten Fasern, 42 m², welche in 4 Ebenen gelagert werden, Grundfläche circa 15 m²
- 17 Paletten Keels, 16 m², welche in 2 Ebenen gelagert werden, Grundfläche circa 13,5 m²
- IBC-Container, 8 m², welche in einer Ebene gelagert werden, Grundfläche circa 8 m²
- 1 Palette Stirnscheiben, 1 m², welche in 1 Ebenen gelagert werden, Grundfläche circa 1 m²
- 1 Regalwand für Betriebsstoffe, welche in 3 Ebenen gelagert werden, Grundfläche circa 6 m²

(16) Sektion 2 Filament-Winding

Einer der wirtschaftlichen Vorteile dieses Verfahrens ist, dass die Grundmaterialien, wie Harzsystem als auch Roving, als Rohstoffe direkt verarbeitet werden [Sch 08]. Neben den duroplastischen Harzsystemen arbeitet die Industrie momentan daran, auch thermoplastische Matrixsysteme breiter zu verwenden.

Im Prinzip ist eine Faser-Wickelmaschine wie eine Drehbank [Mim 09] aufgebaut, vgl. Abbildung 90. Das Grundgestell ist meist eine einfache Schweißkonstruktion, da im Vergleich zu konventionellen Drehbänken keine hohen Anforderungen an die Steifigkeit gestellt werden. Dafür verfügen Wickelmaschinen auch aufgrund der geringeren Massen über eine höhere Dynamik. Der Sinn der Wickelmaschine ist das exakte Ablegen der Rovings, auch Tape genannt, auf dem Wickelwerkzeug. In der Regel verfügen solche Anlagen über folgende Achsen:

- x-Achse: Rotationsachse des Wickelwerkzeugs
- y-Achse: Fahrweg entlang der Wickelkörperachse
- z-Achse: Fahrweg des Verlegekopfes zum Wickelkörper
- u-Achse: Drehachse des Verlegekopfes um die Faserachse

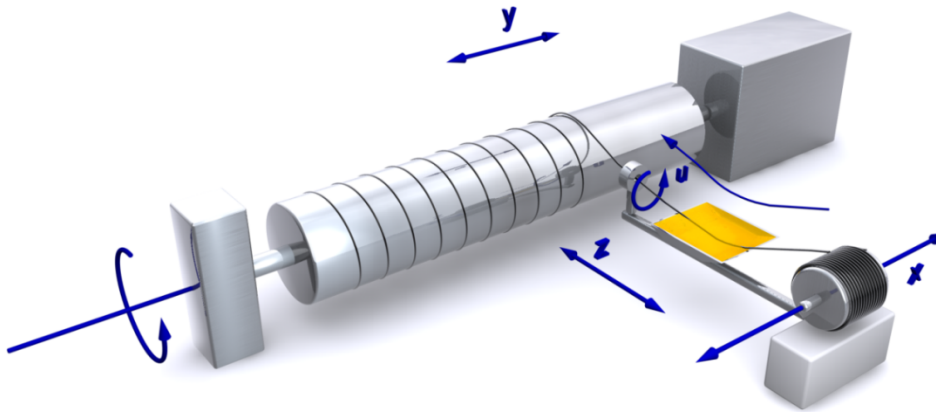


Abbildung 90: Funktionsskizze Wickelmaschine (Quelle: Kuzmany und [TMa 11])

Darüber hinaus, wenn auch seltener, gibt es zwei weitere Funktionsachsen:

- v-Achse: Drehachse des Verlegekopfes senkrecht zur Faserachse (horizontal)
- w-Achse: Verfahrensweg senkrecht zur Wickelkörperlängsachse

Bei den ersten Wickelmaschinen wurden die x- und y-Achse über einen zentralen Antrieb gefahren sowie über ein Getriebe differenziert. Bei den heutigen Maschinen erhält jede Achse einen eigenen individuellen Antrieb. Die Herstellung von Faserverbundbauteilen im Wickelverfahren wird als kontinuierlich bezeichnet. Unterbrochen wird in der Regel der Prozess nur durch das Wechseln der Rovingträger, meist Spulen. Die Beschickung durch das Matrixmaterial erfolgt über Misch- und Dosieranlagen, jedoch nur in seltenen Fällen direkt in das Imprägnierbecken.

(17) Faserhalbzeug

Die verwendete Kohlenstofffaser ist auf einer dickwandigen Pappspule **S** aufgewickelt, welche zum einen als Wickelträger und zum anderen als Aufnahme im Spulenständer dient, vgl. Abbildung 91. Über die Pappspule wird der Fadenzug aufgebracht. Die Spulen haben eine Einmalfunktion und werden im Anschluss entsorgt.

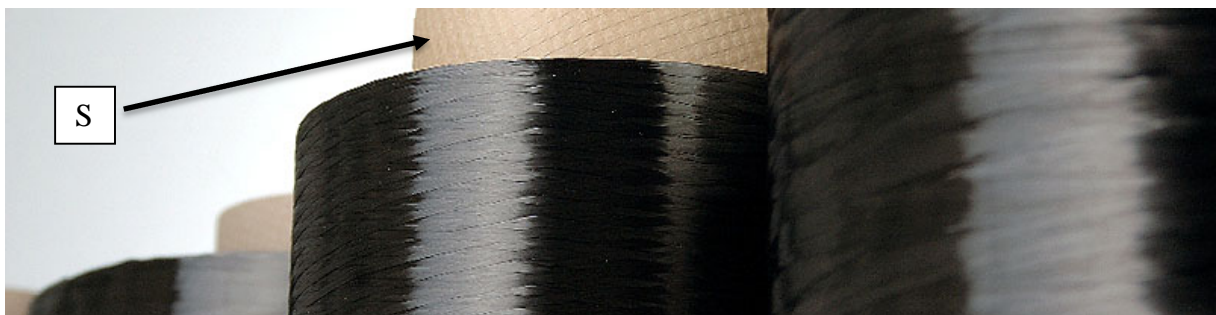


Abbildung 91: Kohlenfaserspule mit Pappträger [THT 11]

(18) Fadenführung im nassen Bereich



Abbildung 92: Fadenführung im nassen Bereich [EHA 11]

(19) Verlegekopf

Dem Verlegekopf kommt in diesem Prozess eine zentrale Bedeutung zu. Das Verlegesystem muss in der Lage sein, das schwere Tape möglichst breit und spaltenfrei abzulegen. Es hat weiterhin die Funktion, den Kopf möglichst nahe, besonders beim Wenden, an das Laminat heranzuführen, sowie bei Störungen, wie Faserabriss, leicht wieder instand gesetzt werden zu können. Die Abbildung 93 zeigt zwei Verlegekopftypen der Firma Waltritsch & Wachter GmbH, jeweils mit starrer und rollender Fadenführung [WWa 11].

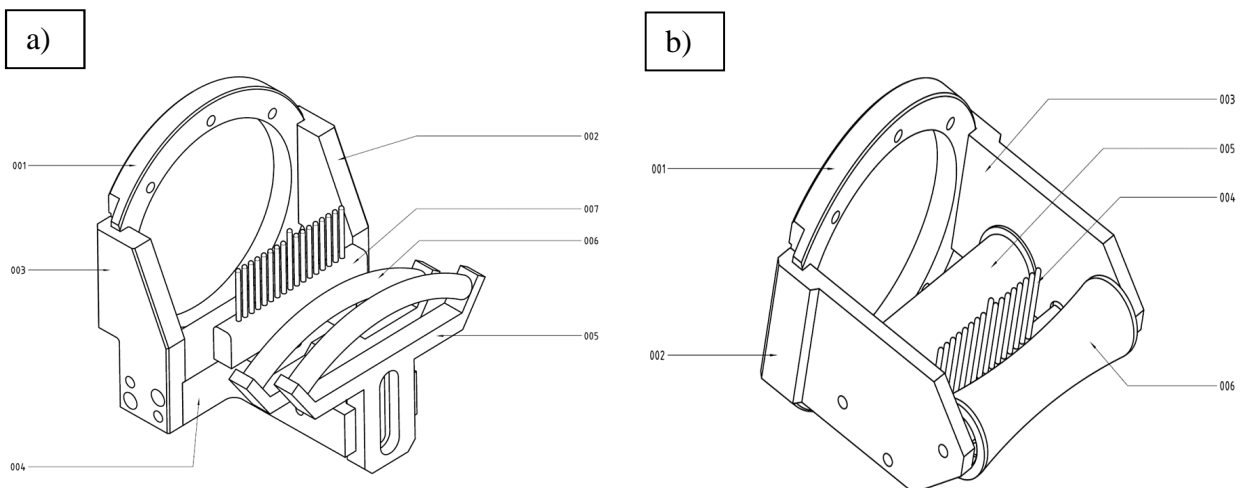


Abbildung 93: Verlegekopf [WWa 11], a) mit starrer Führung, b) Verlegekopf mit Rollenführung, (Originalbild)

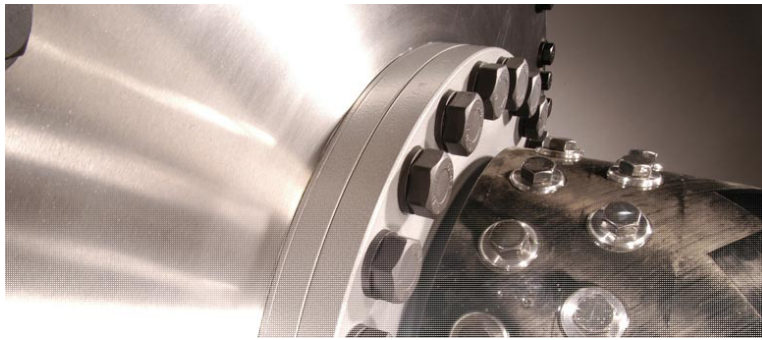
(20) Beispiel Krafteinleitung

Abbildung 94: Beispiel: Krafteinleitung mit Verbolzen/Marine

Quelle: www.xperion-energy.de/images/composite-applications-marine-slide4.jpg, Jahr 2012

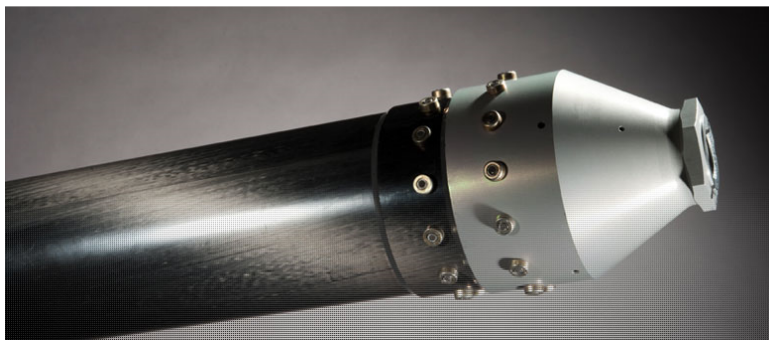


Abbildung 95: Beispiel: Krafteinleitung mit Verbolzen/Aerospace

Quelle: www.xperion-aerospace.de/images/space-innovation-cyrogenicstrut.jpg, Jahr 2013



Abbildung 96: Beispiel: Krafteinleitung über Presssitz

Quelle: www.engineeringteam.com/consultancy.html, Jahr 2013

(22) Funktion der Beschichtung

Beim Untersuchungsgegenstand hat die Beschichtung folgende Aufgaben:

- Versiegeln der FK-Oberfläche: Die Composite-Oberfläche wird durch die verwendete Beschichtungs-Oberfläche gegen das im Betrieb verwendete Polymer PEG geschützt. PEG ist als inert zu bezeichnen, zudem ist es wasserlöslich und nicht giftig. Das PEG ist gefüllt mit SIC, welches die Schneidaufgabe im Prozess übernimmt.
- Führen der Schneiddrähte: Die Beschichtung der Untersuchungstypen hat die Aufgabe, metallische Drähte in einem Durchmesser von circa 0,12 mm zu führen. Hierzu werden mehrere Tausend Rillen in die Beschichtung geschnitten. Diese Rillen führen ein Drahtfeld, welches in der späteren Applikation den Schnitt durchführt.

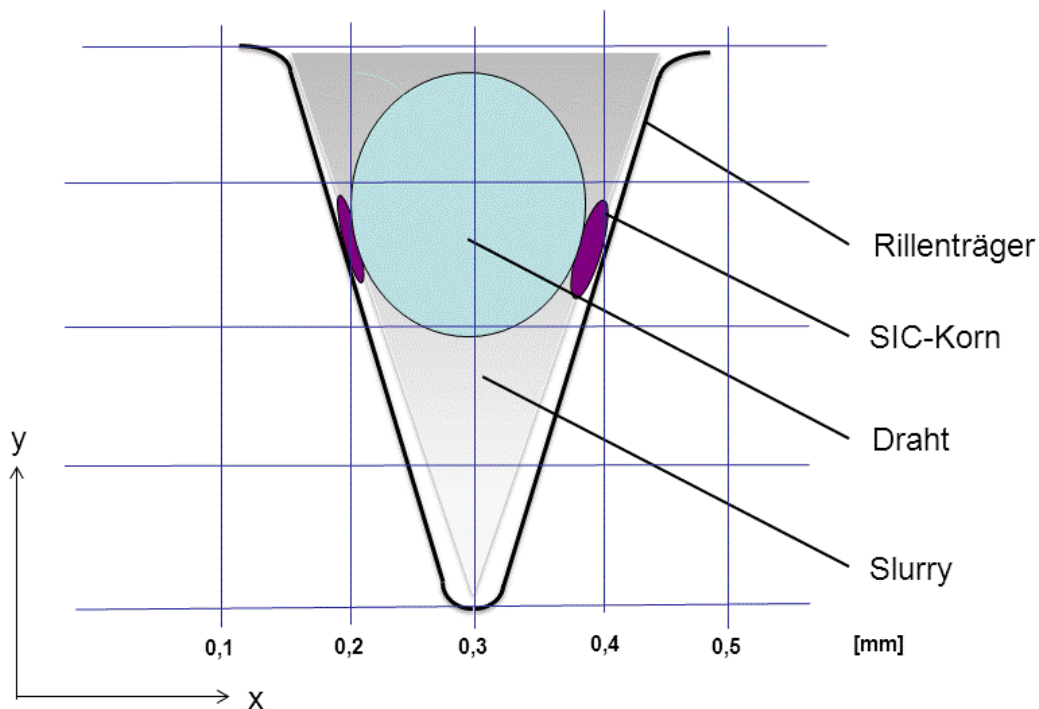


Abbildung 98: Verschleißpartner

Der Verschleißmechanismus setzt sich aus mehreren Faktoren unterschiedlicher Gewichtung zusammen, vgl. Abbildung 98. Das SIC-Korn, welches sich im Slurry (PEG) [IPc 13] befindet, wird durch den aufgespannten Draht zum einen und durch die Rotationsbewegung der Walze zum anderen zwischen den Draht und den Rillenträger der Beschichtung gebracht. Das SIC-Korn wird nun an die Wandung der Rille gepresst, es findet eine Bewegung des Kornes zur Längsachse der Walze statt. Zusätzlich erfährt der Draht noch in Umfangsrichtung eine Relativbewegung. Diese beiden Komponenten sorgen dafür, dass das SIC-Korn eine Verschleißbewegung zwischen Draht und Rillenträger erzeugt. Weiterhin kontaminiert das Schneidmedium das PEG durch den Schnittverlust, was zusätzlich abrasiv wirkt.

(23) Haftvermittlerauftrag

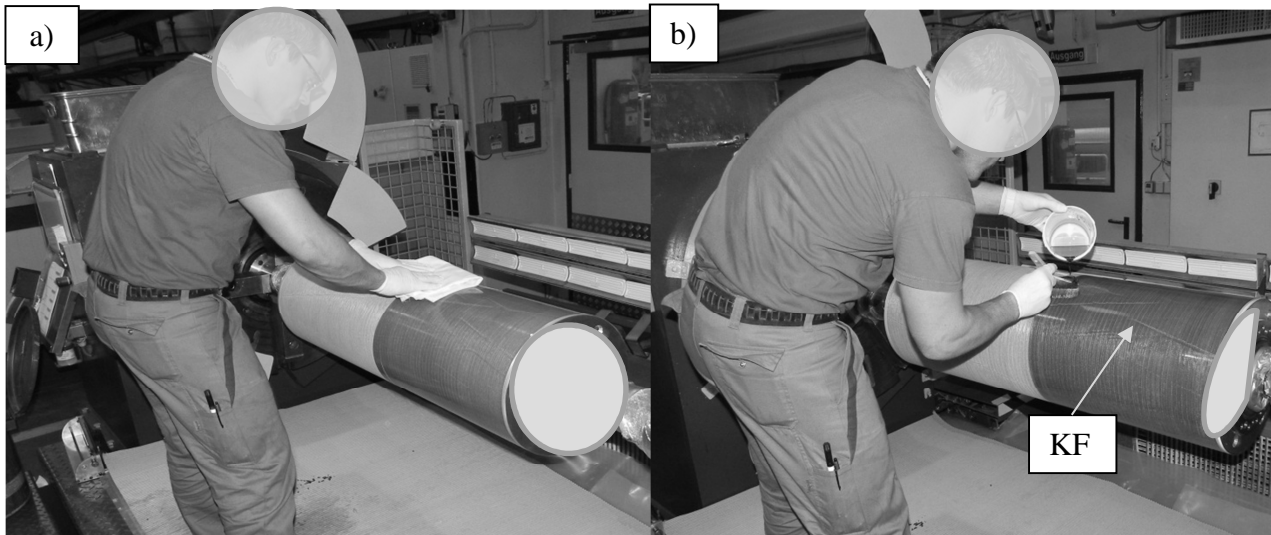


Abbildung 99: Vorbereiten Beschichtung [TMa 11], a) FK-Oberfläche reinigen, b) Auftrag des Haftvermittlers

(24) Beschichtungsprozess

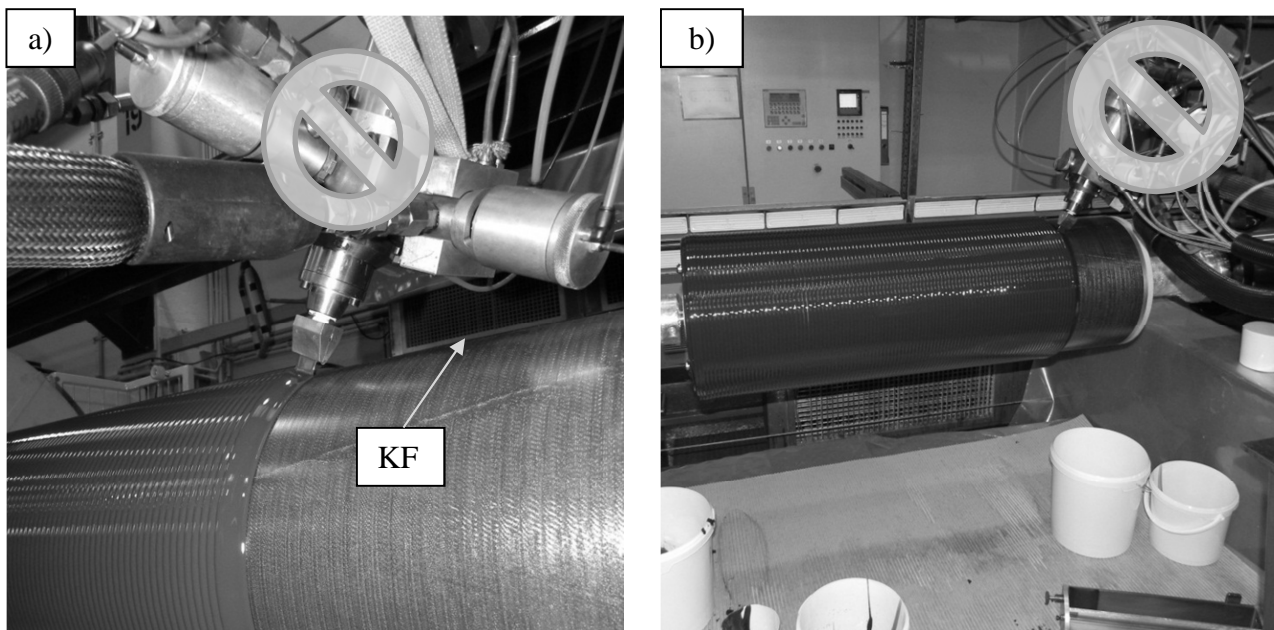


Abbildung 100: Beschichtung [TMa 11], a) Beschichtungskopf mit Breitschlitzdüse, b) Beschichtungssituation

Anmerkung: Stirnseite und Beschichtungskopf aufgrund Geheimhaltung abgeblendet.

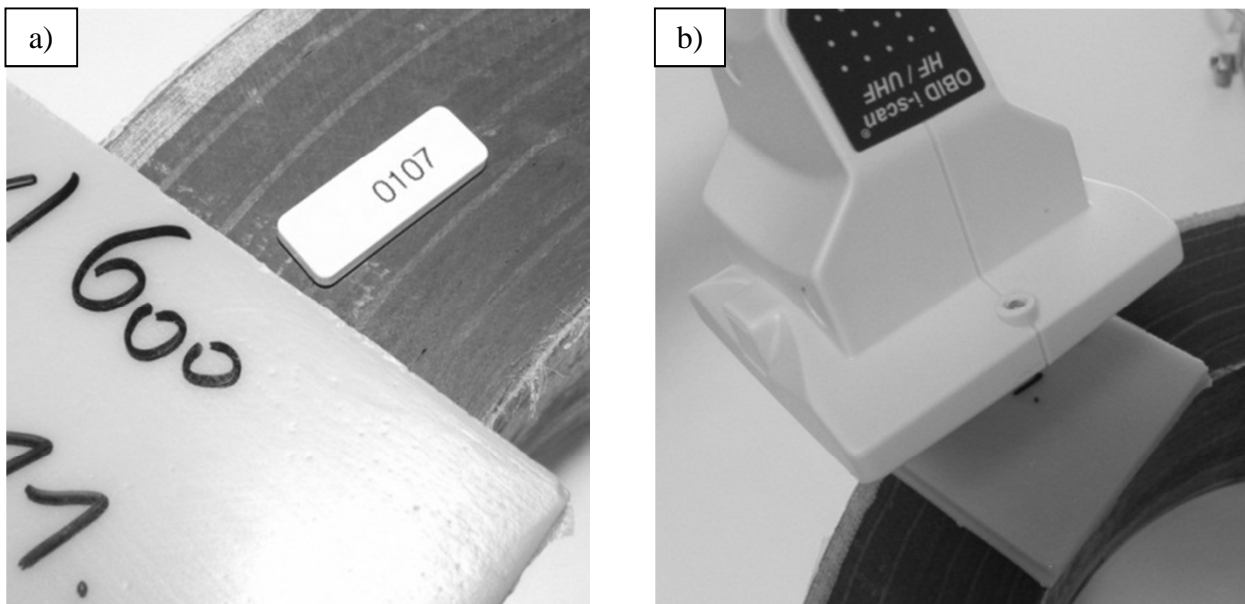
(25) RFID-Technologie

Abbildung 101: RFID [TMa 11], a) RFID positioniert, b) RFID in Ableseposition

(26) Frischwassertank Luftfahrt

Abbildung 102: Frischwassertank vom Typ PC 215 A/B [MTA 13]

(27) Hallenlayout „konventioneller Prozess“

Für die Maschinenpositionen 1 bis 5 wurde folgende Aufteilung der Maschinen gewählt:

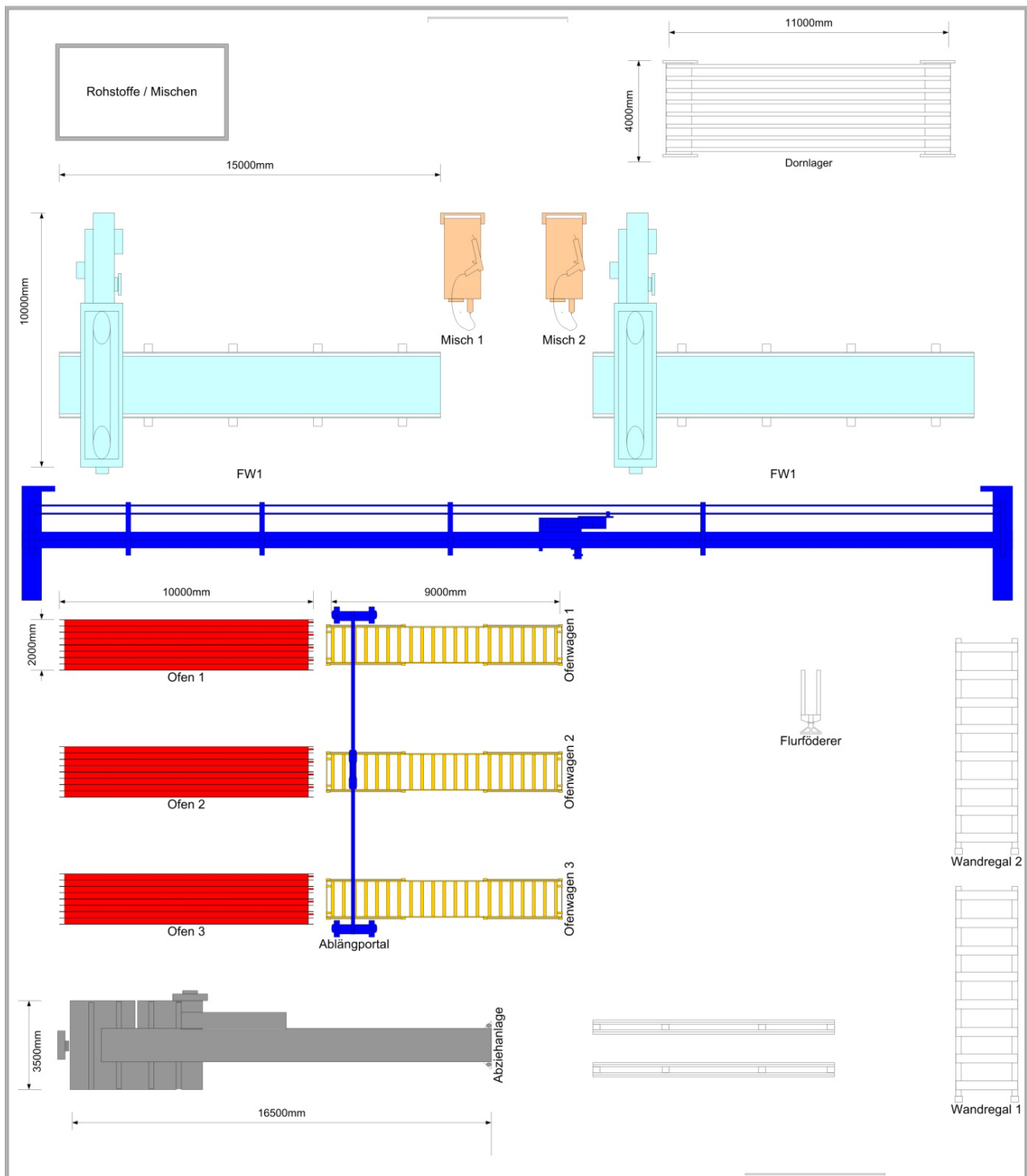


Abbildung 103: Fertigungsstätte 1 [TMa 11]

In der Fertigungsstätte 1, Abbildung 103, sind unmittelbar alle Maschinen vereint, welche zur Laminatherstellung notwendig sind.

Für die Maschinenpositionen 6 bis 13, Abbildung 104, wurde folgende Aufteilung der Maschinen gewählt:

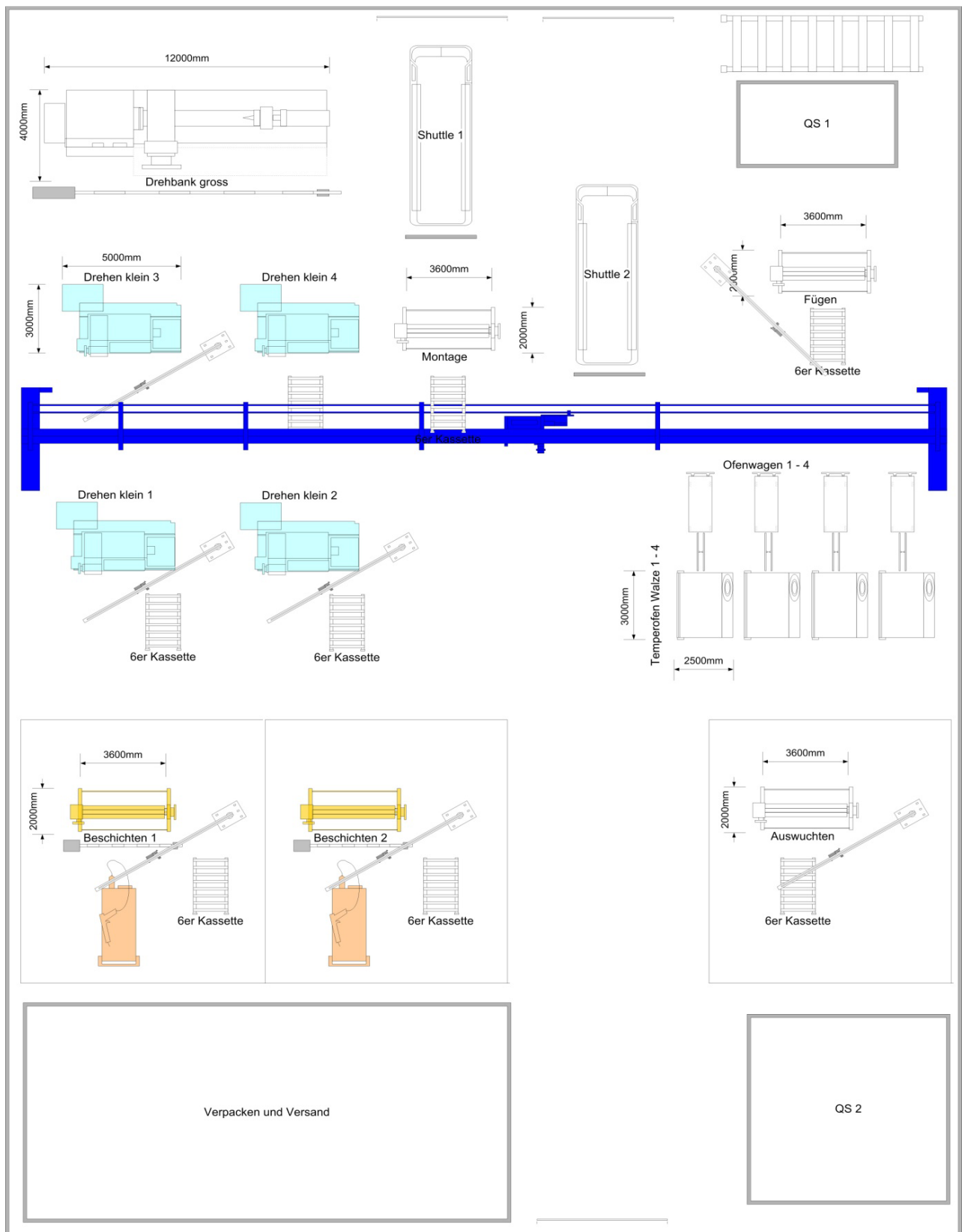


Abbildung 104: Fertigungsstätte 2 [TMa 11]

In der Fertigungsstätte 2 sind unmittelbar alle Maschinen vereint, welche zur Bearbeitung der Lamine notwendig sind.

(28) Materialfluss kv

Tabelle 22: Abwicklungszeiten pro Sektion [TMa 11]

Aktion	Sektion	Maschine	Zeit pro Walze [min]	Zeit pro Sektion [min]
1	1	Dornhandling zum Filament-Winding	5	10
2	1	Rohstoffhandling zur Filament-Windig	5	(Sektion 1)
3	2	Dorn zum Tempern 1	2,5	13,75
4	2	Laminat zum Polkappe trennen	5	
5	2	Dorn zum Filament-Winding	3,75	(Sektion 2)
6	2	Dorn zum Tempern 2	2,5	
7	3	Laminat zum Portionieren	10	50
8	3	Laminat zum Abziehen	10	
9	3	Halbzeug zur Qualitätssicherung 1	5	(Sektion 3)
10	4	Halbzeug zum Fügen	10	20
11	3	Halbzeug zum Tempern	5	
12	4	Halbzeug zur Montage	10	(Sektion 4)
13	3	Halbzeug zur Drehmaschine klein 1	10	
14	5	Halbzeug zur Rotationsvorrichtung	10	35
15	5	Halbzeug zum Tempern 1	10	
16	5	Halbzeug zum Beschichten	10	(Sektion 5)
17	5	Halbzeug zum Tempern 2	5	
18	3	Halbzeug zur Drehmaschine klein 2	10	
19	6	Halbzeug zum Auswuchten	10	20
20	6	Walze zur Qualitätssicherung 2	5	
21	6	Walze zum Verpacken	5	(Sektion 6)

Alle aufgeführten Zeiten sind auf 0,25 min gerundet. Somit ist die Summe der Abwicklungszeiten pro Walze auf 148,75 Minuten definiert. Somit werden nahezu 2,5 Stunden pro Walze für die reine innerbetriebliche Logistik verwendet.

(29) Personalbedarf und Schichtauslastung im konventionellen Prozess

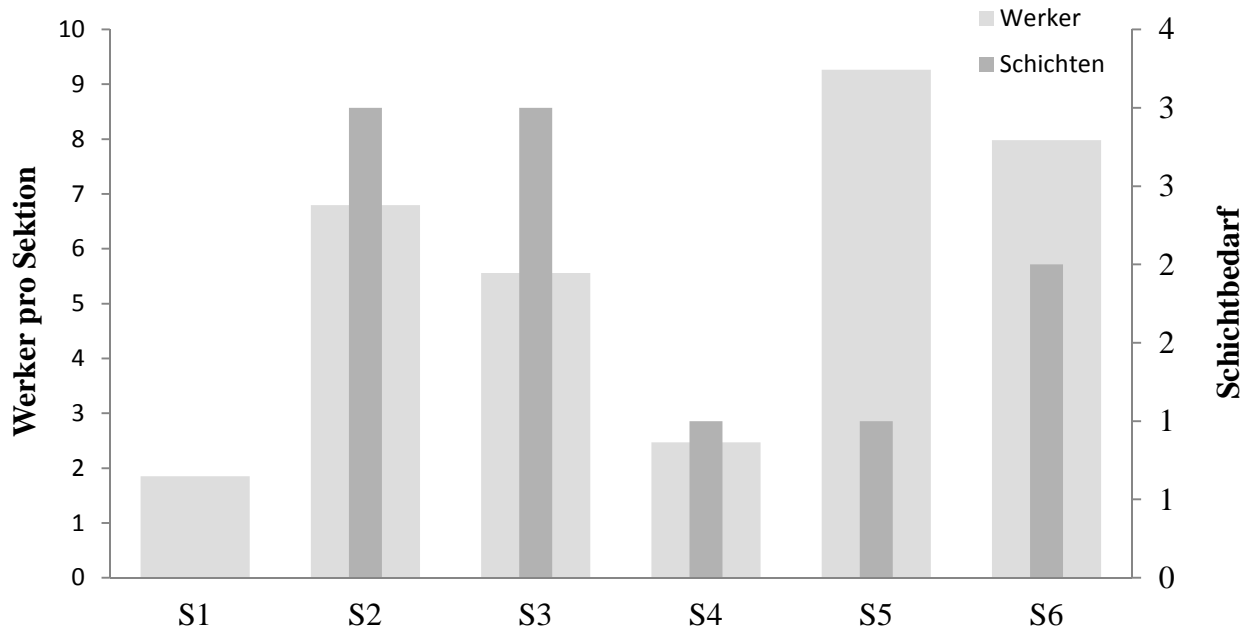


Abbildung 105: Belegungsdaten im konventionellen Prozess [TMa 11]

(30) Abwicklungszeiten im konventionellen Prozess

Durch das dominant manuelle Handling der Halbzeuge entstehen sogenannte Abwicklungszeiten. Diese zeitlichen Aufwendungen sind zwar notwendig, jedoch nicht unmittelbar produktiv. Beschrieben ist die Bewegung zu den einzelnen Bearbeitungsstationen. Für den konventionellen Prozess sind folgende Daten ermittelt worden:

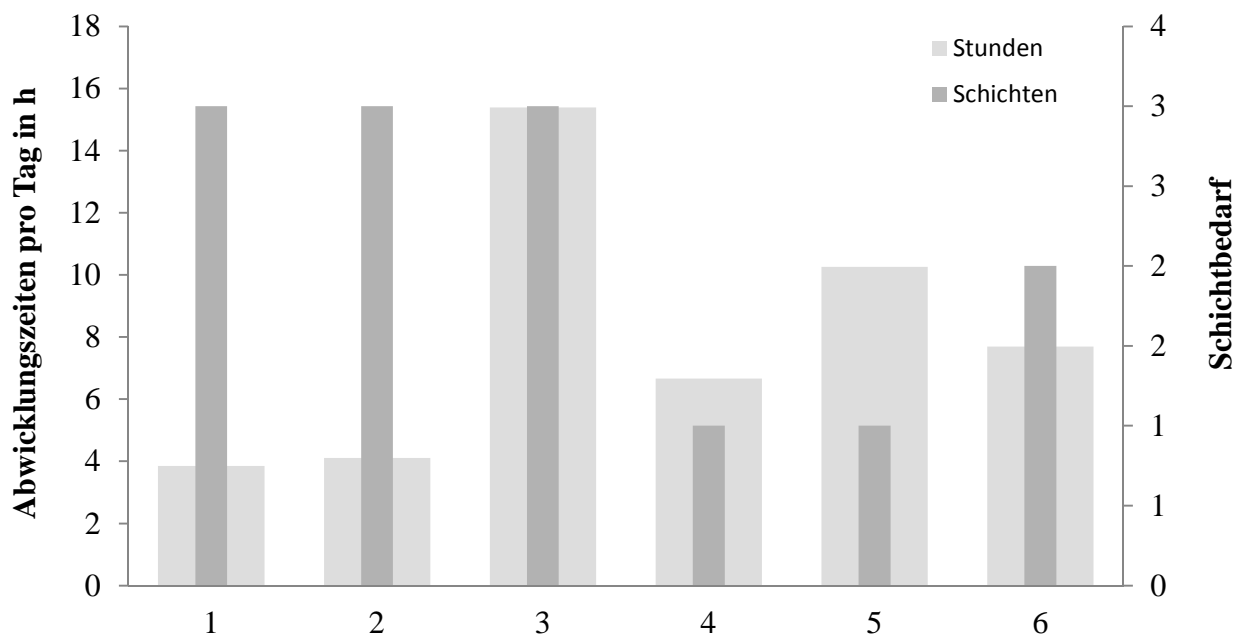


Abbildung 106: Abwicklungszeiten im konventionellen Prozess [TMa 11]

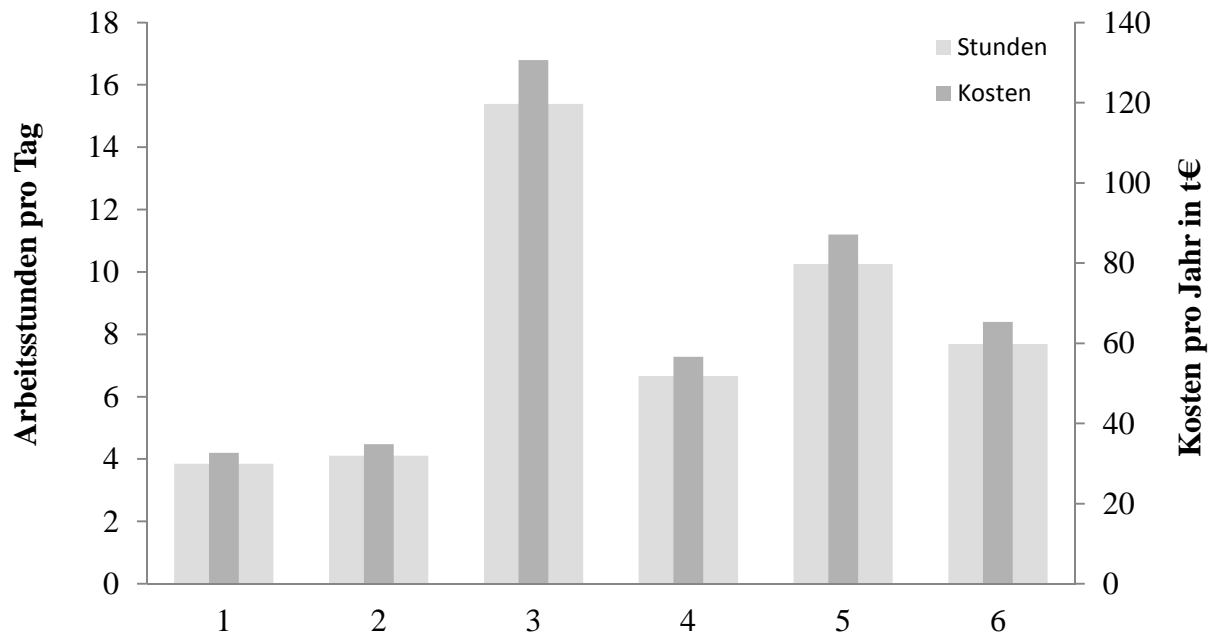


Abbildung 107: Personalkosten pro Jahr zur Abwicklung [TMa 11]

(31) Physikalische Grundlagen zum Auswuchten

In der Praxis werden die auftretenden Amplituden in der Regel als „Schlag“ bezeichnet. Die Größen S1- sowie S2-Schlag sind als dynamische Bewegung zu verstehen, die in allen denkbaren Betriebszuständen zu betrachten sind. Er ist zu unterscheiden vom Rundlauffehler, der durch Ungenauigkeiten beim Drehen oder Schleifen entsteht und beim sehr langsamen Drehen gemessen wird. Bei höheren Drehzahlen wird sich in der Regel ein Schlag einstellen, der sich vom Rundlauffehler drehzahlabhängig stark unterscheidet. Der dynamische Schlag besitzt hauptsächlich eine drehzahlsynchrone Komponente, genannt S1-Schlag, und eine Komponente, die mit doppelter Drehzahl schwingt, der S2-Schlag. Die drehzahlsynchrone Komponente wird durch Unwucht erregt, ist somit auf Fehler in der Massenverteilung zurückzuführen. Der S2-Schlag kann teilweise ebenfalls durch Fliehkräfte verursacht werden, wenn nämlich bei höheren Drehzahlen der Walzenquerschnitt elliptisch verformt wird. Das technische Interesse richtet sich hier jedoch hauptsächlich auf die sogenannte halbkritische Drehzahl, bei der Fehler in der Steifigkeitsverteilung im Zusammenwirken mit der Schwerkraft die niedrigste Biegeeigen-schwingung anregen. Entsprechend den Entstehungsursachen kann der S1-Schlag durch Auswuchten bekämpft werden, während nachträgliche Korrekturen an der Steifigkeitsverteilung praktisch kaum möglich sind. Infolgedessen steht die Amplitude des S2-Schlags nach der Herstellung des Walzenkörpers fest.

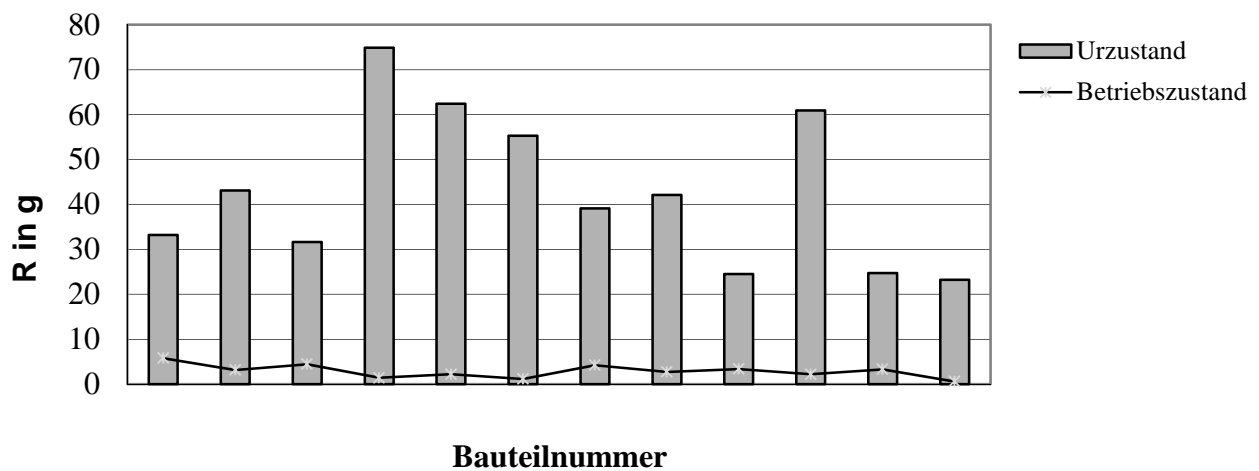
(32) Wuchtzustand

Abbildung 108: Wuchtzustand vor und nach dem Auswuchten

(33) Abnahmen der Produktionsstunden beim Bau von Flugzeugen

Abbildung 109: Bau von gleichartigen Flugzeugen

Quelle: Web Site of National Museum of the USAF, 2012

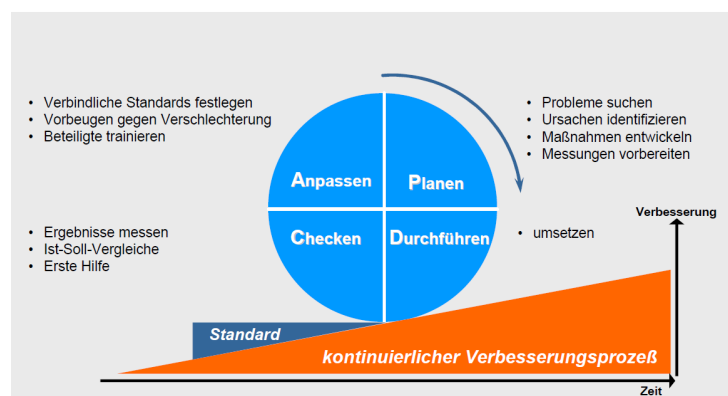
(34) Deming-Rad

Abbildung 110: Deming-Rad nach Hutwelker

(35) Beschaffung Keel

Aus den 116 erfassten Werten ergab sich folgende Verteilung an Passmaßen:

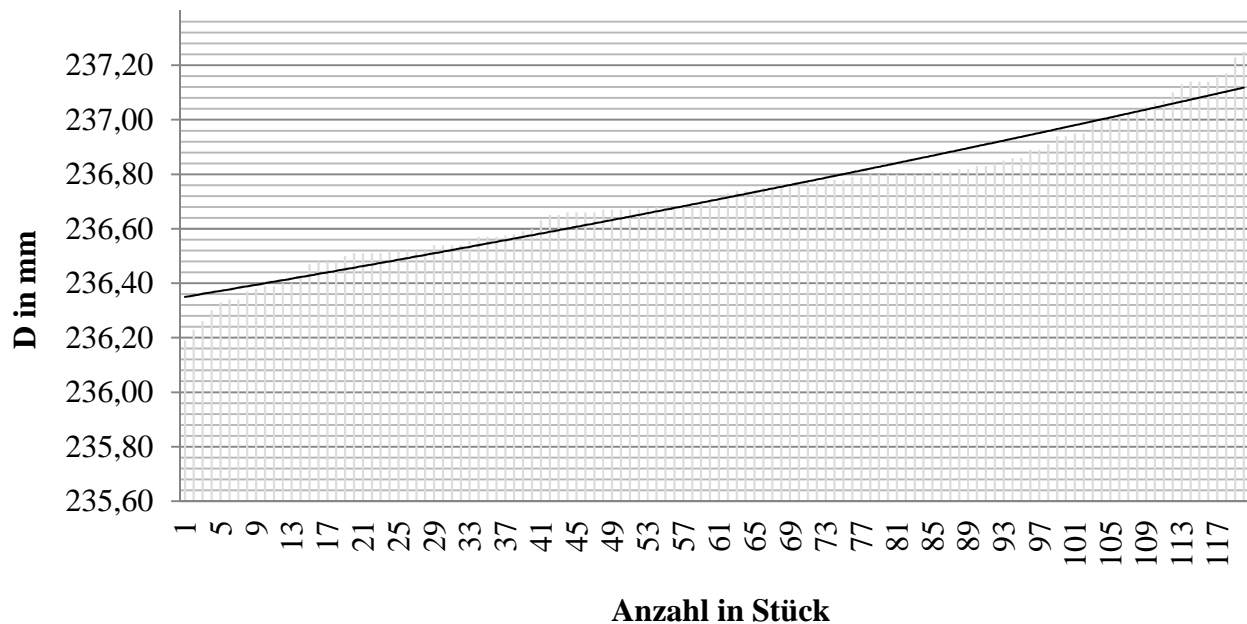


Abbildung 111: Verteilung Außendurchmesser Keel [TMa 11]

(36) Beschreibung der Maschinen (kv)

Für das Herstellen des Untersuchungsgegenstandes sind folgende Maschinen notwendig:

Tabelle 23: Verwendete Maschinen im konventionellen Prozess [TMa 11]

Position	Sektion	Bereich	Maschine	Verwendung
1	1	1	Mischanlage für Laminierharz	Vorbereitung Matrixsysteme
2	2	1	Filament-Winding Anlage	Herstellen der FK-Rohre
3	2	1	Temperofen FW	Härten der FK-Rohre
4	3	1	Polkappentrennvorrichtung	Entfernen der Polkappen
5	3	1	Abziehanlage	Entformen vom Laminat
6	3	2	Drehmaschine groß	Ablängen der Lamine
7	3	2	Drehmaschine klein	Ober- und Planfläche bearbeiten
8	4	2	Fügeanlage	Fügen der Keels
9	5	2	Drehvorrichtung Walze	Rotation der gefügten Halbzeuge
10	5	2	Beschichtungsanlage	Beschichten der DTS
11	5	2	Temperofen Haftvermittler	Härten des Haftvermittlers
12	5	2	Temperofen Walzen	Härten der Beschichtung
13	6	2	Auswuchtmaschine	Auswuchten der DTS

zu Kap. 6: Energie, Leane Grundsätze und Beschreibungen

(37) Benzinpreiserhöhung und der verbundene Druck auf die Prozessautomatisierung

Noch im Jahr 1950 befand sich der Benzinpreis bei knappen 30 Eurocent [EnR 12]. In den folgenden zwei Jahrzehnten schwankte der Benzinpreis unerheblich im Bereich von 20 bis 40 Eurocent. Im Sommer 2005 schließlich durchbrach der Ölpreis, vorangetrieben durch den Boom der chinesischen Volkswirtschaft, die 1,2-Euro-Marke und im November desselben Jahres überschritt dieser die 1,4-Euro-Grenze. Wie Abbildung 112 zeigt, verlief die Preissteigerung ab 1988 interpoliert um 4,1 Cent pro Jahr. Experten prognostizieren in den nächsten Jahren Benzinpreise von über 2 Euro pro Liter.

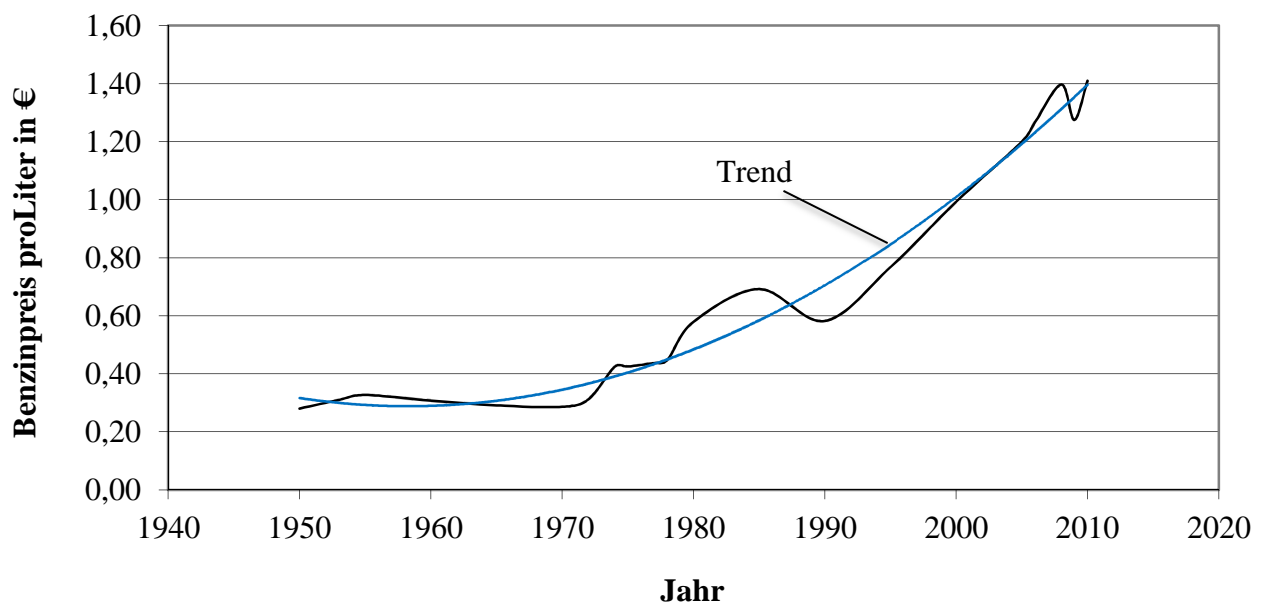


Abbildung 112: Veränderung der Benzinpreise der letzten Jahre [TMa 11]

Die beschriebene Situation zwingt uns andere Energiearten zur Bewegung von Kraftfahrzeugen auf. Eine Alternative stellt Flüssiggas dar. Dieses entsteht zum Beispiel bei der Raffinerie von Benzin und Dieselerzeugung als Nebenprodukt. Lange Zeit war der wirtschaftliche Wert zu gering, sodass das Gas an der Förderstelle gleich abgefackelt wurde. Technisch wird zwischen LPG (Liquefied Petroleum Gas) und CNG (Compressed Natural Gas) unterschieden. LPG ist ein Propan-Butan-Gemisch und wird bei 5 bis 10 bar flüssig gespeichert. CNG ist Methan basierend und wird gasförmig bei 200bar gehalten. CNG reduziert den CO₂-Ausstoß gegenüber Benzinverbrennung um circa 25 %. LPG ist Stand 2010 einfacher nachzurüsten als CNG. Der Bedarf an NGV (Natural Gas Powered Vehicles) ist in den letzten Jahren stark gewachsen. Bereits 2009 wurden über 11 Mio. Erdgasautos weltweit gezählt (Quelle: NGV Group), Tendenz steigend. Als Speichermedium stehen zurzeit vier Typen von CNG Tanks zur Verfügung. Typ 1 ist Ganzmetall, Typ 2 ist ein im Zylinderteil mit GFK umwickelnder Metallbehälter, Typ 3 ist ein mit Composite ganzflächig umwickelnder Metallliner und Typ 4 ist ein mit Composite ganzflächig umwickelnder Kunststoffliner. Das relative Gewicht (kg/Liter) der Behälter ist von Typ 4 nach 1 fallend, die Kosten der Behälter von Typ 1 bis 4 steigend. Mehr als 90 % vom Marktvolumen nimmt der Typ 1 in Anspruch, Typ 2 bis 4 in Summe weniger als 10 %. ROBERTS [Rot 08]

prognostiziert eine Verdopplung von 2007 bis 2014 der Typen 3 und 4. Das zur Herstellung der Drucktanks benutzte Verfahren ist der Filament-Winding-Prozess. Aufgrund der hohen Stückzahlen und des Preisdrucks war dieser Schritt der Automatisierung notwendig, um die Existenzberechtigung im Markt aufrecht zu erhalten.

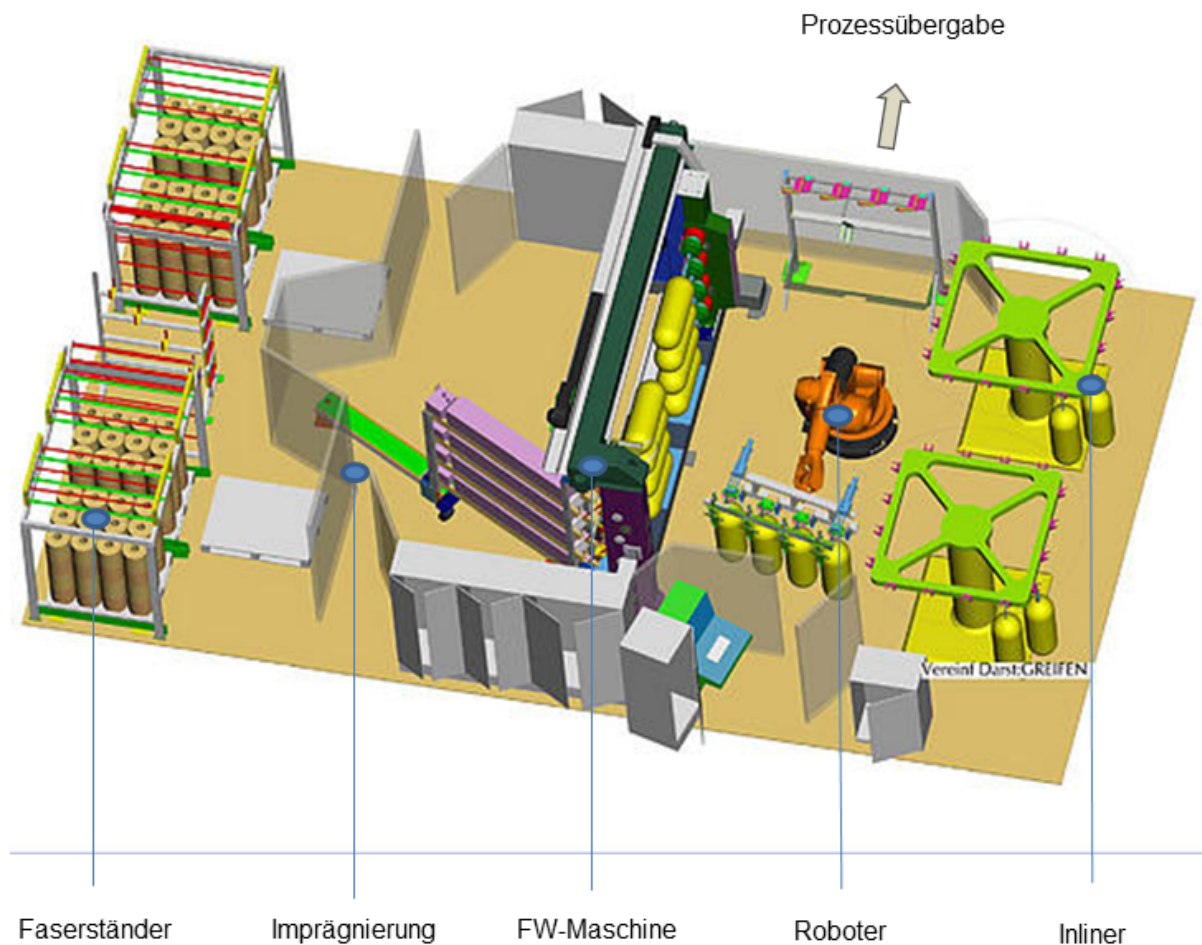


Abbildung 113: Beispiel einer automatisierten Zylinder-Produktion [EHA 11]

Abbildung 113 zeigt ein Beispiel einer hoch automatisierten Fertigungsanlage der Firma EHA Spezialmaschinen GmbH. Der Faserständer versorgt die FW-Maschine mit dem Faser-Rohstoff, dieser wird über die Imprägnierstrecke auf den Inliner gelegt. Der Roboter versorgt die Anlage mit Inlinern, nimmt diese nach dem FW-Prozess von der Maschine ab und übergibt das Magazin dem Temperofen. Optional kann der Prozess mit thermoplastischer Matrix gefahren werden, was den anschließenden Temperprozess nicht mehr verlangt. Dieser Automatisierungsgrad mit hoher Integration der einzelnen Sub-Prozesse ist einzigartig und zeigt das hohe Potenzial dieser Technologie auf.

(38) Anwendung der Leanen Grundsätze, die 7 Elemente

Just in time (JIT) ist der Begriff für ein ziehendes System [Brf 08], welches dafür steht, dass nur diese Mengen produziert werden, welche auch vom Kunden verlangt und abgenommen werden. Es wird hierbei von Synchronisierung gesprochen. Dies hat im positiven Sinn zur Folge, dass ein Aufbau von Beständen verhindert wird. Diese Regelung gilt nicht nur im Außenverhältnis zum Kunden, sondern auch im Innenverhältnis zu Lieferanten und auch zu den einzelnen Fertigungsbereichen untereinander. Der Aufbau von Beständen, also fertigen oder halb fertigen

Produkten, führt zu einer Art der Verschwendung in wirtschaftlicher Sicht. Unten aufgeführt sind die wesentlichen 7 Elemente, auf welches sich das System stützt:

1. Angemessene technische Ausstattung
2. Wenig hierarchische Arbeitsorganisation
3. Konsequentes Qualitätsmanagement
4. Kontinuierlicher Verbesserungsprozess
5. Qualifikation und Motivation
6. Just-in-time-Produktion
7. Wertschöpfungs- und Prozessorientierung

(39) Lean-Bausteine

Automatisierung und Prozessoptimierung

Eine angepasste und robuste Automatisierung mit maximaler Prozesssicherheit ist der erste Baustein der schlanken Produktion.

Teamarbeit und Mitarbeiterintegration

Ein Maximum an Aufgaben und Verantwortungen wird auf die Werker übertragen. Vorarbeiter sind in den Wertschöpfungsprozess integriert. Das Team ist als Ganzes verantwortlich und wird auch so beurteilt. Kleinere Maschinendefekte werden vom Team selbst behoben. Selbstständige Gruppen, Jobrotation und wenig indirekte Mitarbeiter prägen das Bild. Konzentration auf die Wertschöpfung mit konsequenter Einhaltung der Taktzeiten runden dieses ab. Die Ausbildung multifunktionaler Mitarbeiter mit höchster technischer Qualifikation und Sozialkompetenz. Reduktion der Hierarchieebenen und Übertragung von Verantwortung steigern das Leistungsvermögen.

Kaizen

Hierunter ist die Veränderung zum Besseren zu verstehen [Imm 02], [KcK 07]. Im westlichen Sprachgebrauch entstanden hieraus der „Kontinuierliche Verbesserungsprozess“ (KVP) beziehungsweise der „Continuous Improvement Process“ (CIP).

Total Quality Control

Eine weitgehend automatische Fehlerkontrolle, welche auftretende Fehler, soweit es möglich ist, selbst beseitigt. Dies in Kombination mit einem System, welches die Ursache rasch und nachhaltig abstellt (Poka Yoke). Auch als „Narrensicherheit“ bekannt, so zu verstehen, dass alle Abläufe fehlersicher gestaltet sind. Um Nacharbeit oder sogar Ausschuss zu vermeiden, ist eine Basis des Lean-Management-Prozesses die Null-Fehler-Strategie. Die Konsequenz dieser Methode verlangt eine hohe Qualität des Ausstoßes. TAICHI OHNO führte sehr früh in der Anfangsphase ein „Problemlösungssystem“ ein, genannt „die fünf Warum“. Die Produktionsarbeiter lernten, Fehler systematisch zu hinterfragen, bis die Ursache gefunden wurde. Das Resultat war die Eliminierung der Nacharbeitszonen. Wenn ein Arbeiter ein defektes Teil identifiziert, so etikettiert er dieses und sendet es zur Qualitätskontrolle zurück. Dort angekommen wird das Teil auf seine Fehlerursache untersucht.

Kanban

Kanban ist eine Methode der selbststeuernden Produktion nach dem Holprinzip [GHK 03]. Der Materialfluss ist hierbei vorwärts gerichtet (vom Erzeuger zum Verbraucher), während der Informationsfluss rückwärts gerichtet ist. Als Hilfsmittel zur Just-in-time-Produktion hilft das aus Japan stammende Kanban-System. Kanban ermöglicht mit einem Kartensystem eine Reduzierung der Lagerbestände von Produkten, die für die Herstellung benötigt werden. Der Sinn ist, den täglichen Teilefluss innerhalb des Zuliefersystems zu koordinieren. Es sollen bei jedem Arbeitsschritt nur so viele Teile produziert werden, wie der Bedarf ist. Im idealen Fall werden somit alle Lagerbestände beseitigt. Diese Idee ist zwar einfach in der Struktur, jedoch kompliziert in der Umsetzung. Es bedeutet im Extrem, dass beim Fehlen eines kleinsten Teiles der gesamte Prozess zum Stocken kommt. Auf der anderen Seite werden Fehler in der Kette sofort transparent, da es keine Möglichkeit gibt, diese über Puffer zu bedienen. Kanban kann als Synchronisation der Fertigung verstanden werden. Die Herausforderung besteht aus einem schnellen und effizienten Kommunikationssystem.

Voraussetzungen hierfür sind:

- ein Produktionsprozess in optimierter und störungsfreier Form
- Fließfertigung
- harmonisierte Kapazitäten

Muda (Verschwendung)

Zentraler Gedanke des „Leanen“ Systems ist die Auffindung und Eliminierung von Verschwendung. Verschwendung ist kontraproduktiv und steht im Widerspruch zur Wertschöpfung. Unter Verschwendung fallen Aktionen, wie Überproduktion, Bestände, Wartezeiten, Transport, Fehler und so weiter.

(40) Die Geschichte von 5S

Unmittelbar nach dem Zweiten Weltkrieg reiste SAKICHI TOYODA zu einem Arbeitsbesuch in die USA. FORD sprach die Einladung mit dem Zweck des Besuchs der damals sehr wegweisenden Ford-Fabriken aus. TOYODA war von der Fabrik nicht sonderlich beeindruckt. Vielmehr interessierte ihn die Struktur des regionalen Supermarktes. Der Aufbau des Supermarktes selbst, mehr die Art der Lagerung und des Nachschubs, übersichtlich und visuell organisiert, dass die Vorratsregale erst wieder aufgefüllt werden, nachdem Kunden etwas gekauft hat, beeindruckte ihn. TOYODA erkannte, dass er für die Weiterentwicklung seines Unternehmens die Produktion an die Prinzipien eines Supermarktes anpassen muss.

In den 1950er-Jahren wurde bei Toyota als Teil des Toyota-Produktionssystems die 5S-Arbeitsplatzorganisation entwickelt, angeregt von der Just-in-time-Organisation des Piggly-Wiggly-Supermarktes. Anfänglich existierten nur vier S, das fünfte wurde nachträglich hinzugefügt. 5S steht für die fünf Phasen bzw. Säulen, deren Bezeichnungen auf Japanisch alle mit einem S beginnen. Auf Japanisch lauten diese: Seiri (Sortieren), Seiton (Systematisieren), Seiso (Säubern), Seiketsu (Standardisieren) und Shitsuke (Selbstdisziplin) [TS 11].

(41) Eliminierung der Verschwendung

Natürlich ist es nahezu unmöglich, jegliche Verschwendung zu eliminieren. Dies sei an zwei einfachen Beispielen erklärt: Ein Roboter, welcher mit einer Auslastung von 85 % arbeitet, hätte

somit einen 15-prozentigen Verschwendungsanteil. Ein Operator, welcher bedingt durch das maschinelle Einspannen kurzzeitig in Warteposition ist, würde einen Beitrag zur Verschwendung leisten. Somit ist in jedem noch so gut organisiertem Fertigungsprozess Verschwendung gegenwärtig. In vielen Produktionsstätten existieren hohe Materialbestände, sowohl im als auch nach dem Fertigungsprozess. Meistens geschieht dies aus einem Sicherheitsdenken heraus, um Fehlteile auf der Zulieferseite, Maschinenausfälle oder schlechte Fertigungsqualität zu kompensieren, ohne dass dies unmittelbare Auswirkungen auf den Abnehmer hat. Für die meisten Firmen ist dies Gegenstand des täglichen Arbeitens und ein akzeptabler Zustand, da ständig Probleme in irgendeiner Art zu Verzug führen. Zielführend ist es nun, diese Abweichungen, welche zur Verschwendung führen, zu erkennen und diese in der Folge zu eliminieren. Das Ziel ist somit, die Verschwendung durch Wertschöpfung zu ersetzen. Das Toyota-Produktionssystem (TPS) unterscheidet hierbei sieben Arten der Verschwendung. Die Verschwendung wird im japanischen Sprachgebrauch als Muda betitelt. Der Prozess zur Erkennung und Beseitigung von Verschwendung wird auch gerne als Muda-Elimination bezeichnet [TS 11]. Das TPS separiert die folgenden Verschwendungsarten:

Überproduktion

Von Überproduktion, auch Overprocessing genannt, ist die Rede, wenn mehr produziert wird als geplant wurde. Gründe dafür können sein: zu viele Mitarbeiter in einer Schicht wegen schlechter Schichtplanung, Aufbau von Lagerbeständen als Sicherheit gegen Maschinenstörungen bzw. vorbeugend gegen mindere Produktionsqualität; generell, wenn mehr Zeit (Arbeit) und Material verwendet wird, als der Kunde verlangt.

Überflüssige Bewegungen

Hierunter fallen zum Beispiel eine nicht ergonomische Anordnung von Maschinen, Werkzeugen oder Werkstücken. In Konsequenz führt dies zu unnötigen Bewegungen des Operators. Auch lange Anfahrwege von Werkstücken führen zu unnötigen Bewegungen und somit unter Umständen zu Wartezeiten des Bedieners.

Wartezeit des Operators oder der Maschine

Wartezeiten können durch fehlendes Material, durch Störungen oder Stillstandszeiten von Maschinen entstehen. Ein stillstehender Prozess schafft keinen Mehrwert.

Transporte

Transporte jeglicher Art sind Verschwendung, da sie das Werkstück durch diese Aktionen nicht dem Endzustand näher bringen, sondern nur seine Position in der Fabrik verändern. Je höher der Lagerbestand, desto mehr müssen Produkte umhergefahren werden.

Überbearbeitung (Kontrolle)

Hierunter sind zu aufwendige und/oder überflüssige Arbeitsgänge zu verstehen. Qualitätskontrollen sind sinnvoll einzusetzen. Es gibt einen Zusammenhang zwischen dem Maß der Kontrolle und der Zuverlässigkeit von Prozessen. Je weniger zuverlässig ein Prozess ist, desto stärker müssen der Prozess an sich und die Produkte dieses Prozesses kontrolliert werden.

Hohe Materialbestände (Lagerbestand)

Ein Lagerbestand verursacht zwangsweise Kapitalbindung. Lagerbestand ist eine Form des Wartens. Der Prozess wartet zwar nicht, aber die Produkte.

Nacharbeit und Ausschuss (Fehler und Mängel)

Ideale Prozesse schaffen Produkte oder Dienstleistungen, die auf Anhieb korrekt sind. Bauteile, die nicht den Qualitätsanforderungen entsprechen, dürfen im nachfolgenden Prozess nicht weiterbearbeitet werden. Dies führt zu höheren Herstellkosten.

(42) Beschreibung der Maschinen für den Leanen Prozess

Tabelle 24: Anzahl der verwendeten Maschinen im Leanen Prozess

Position	Sektion	Maschine	Anzahl	Spindel
1	1	Mischanlage für Laminierharz	1	1
2	1	Kernvorbereitung	1	2
3	2	Filament-Winding-Anlage + IR	1	2
4	2	Temperofen Laminat	1	6
5	2	Polkappen- und Portaltrenner	1	1
6	3	Abziehanlage (Entformen)	1	1
7	3	Deckenkranautomat (Handling)	2	1
8	4	Fügeanlage	1	1
9	4	Handlingautomat	2	1
10	4,7	Shuttle (Flurförderer)	7	2
11	5	Drehmaschine	2	1
12	5	Drehvorrichtung	2	1
13	5	Beschichtungsanlage + IR	1	1
14	5	Temperofen DTS/PUR	1	16
15	5,6	Roboter	1	1
16	7	Auswuchtmaschine	1	1

(43) Befragte Maschinenlieferanten

Tabelle 25: Befragte Maschinenlieferanten

Firmennamen	Land	Stadt
EHA Composite Machinery	Deutschland	Steffenberg
Elektro-Maschinenbau H.W. GmbH	Österreich	Neusiedl bei Berndorf
FILL GmbH	Österreich	Gurten
Ingenieurbüro TARTLER GmbH	Deutschland	Lützelbach- Haingrund
MACON Automatisierungstechnik	Österreich	Pitten
MT Aerospace AG	Deutschland	Augsburg
POLYTEC EMC GmbH & Co KG	Österreich	Marchtrenk
Voith Industrial Services	Deutschland	Chemnitz
Waltritsch & Wachter GmbH	Deutschland	Bodnegg-Rotheidlen

(44) Befragte Rohstofflieferanten

Tabelle 26: Befragte Rohstofflieferanten

Firmennamen	Land	Stadt
Grafil Inc	USA	Sacramento
Hexcel Composites GmbH	Deutschland	Stade
Huntsman Advanced Materials GmbH	Schweiz	Basel
SGL Carbon GmbH	Deutschland	Meitingen
Toho Tenax Europe GmbH	Deutschland	Wuppertal

(45) Abwicklungszeiten im Leanen Prozess

Tabelle 27: Errechnete Abwicklungszeiten pro Sektion im Leanen Prozess [Fil 12]

Aktion	Sektion	Maschine	Zeit pro Walze	Zeit pro Sektion
			[min]	[min]
1	1	Dornhandling zum Filament-Windig	1,5	
2	1	Rohstoffhandling zur Filament-Windig	0	
3	2	Dorn zum Tempern 1	2,5	10
4	2		0	
5	2		0	
6	2		0	
7	3	Laminat zum Portionieren	2	
8	3	Laminat zum Abziehen	2	(Sektion 1 - 3)
9	3;4	Halbzeug zur Qualitätssicherung 1	2	
10	4	Halbzeug zum Fügen	2	2,5
11	4		0	(Sektion 4)
12	4;5	Halbzeug zum Montage	0,5	
13	5	Halbzeug zur Drehmaschine klein 1	0,5	
14	5	Halbzeug zur Rotationsvorrichtung	0,5	5,0
15	5	Halbzeug zum Tempern 1	0,3	
16	5	Halbzeug zum Beschichten	0,7	
17	5	Halbzeug zum Tempern 2	0,5	
18	5	Halbzeug zur Drehmaschine klein 2	0,5	(Sektion 5 - 6)
19	5;6	Halbzeug zum Auswuchten	1,5	
20	6	Walze zur Qualitätssicherung 2	2	3
21	6	Walze zum Verpacken	1,5	(Sektion 7)